

近接場光ディスクドライブシステムにおける
ナノギャップ技術に関する研究

Studies on nano-gap technologies
in a near-field optical disk drive system

2008 年 2 月

石本 努

目 次

第1章 序論	5
1.1 光ディスクシステムの研究開発動向	5
1.2 光ディスクの大容量化技術動向	6
1.3 近接場光による高密度化手法	10
1.4 SIL型近接場光ディスクシステムにおけるナノギャップ問題	11
1.5 本研究の目的及び構成	12
参考文献	15
第2章 近接場光ディスクシステム	19
2.1 はじめに	19
2.2 SILによる近接場技術	19
2.3 SIL型近接場光ディスクシステムの光学解像度	21
2.4 SIL型近接場光ディスクシステム	22
2.5 まとめ	24
参考文献	26
第3章 ナノギャップサーボ技術	27
3.1 はじめに	27
3.2 ギャップエラー検出方法	27
3.2.1 従来の検出手法	27
3.2.2 光学式ギャップエラー検出手法	28
3.2.3 光学式ギャップエラーの検出光学系	30
3.2.4 ギャップエラー評価方法	33
3.3 ギャップサーボシステム	34
3.3.1 基本構成	34
3.3.2 ギャップサーボ仕様	35
3.3.3 リファレンスサーボ	38
3.4 メインループの高帯域化手法	40
3.4.1 レンズアクチュエーターのモデル化	40
3.4.2 ドライブ回路方式	42
3.4.3 サーボフィルタ設計	43
3.4.4 デジタルフィルタのハードウェア実装化	45
3.4.5 サーボフィルタの評価	49
3.4.6 繰り返しサーボによるギャップサーボ性能の改善	51
3.4.7 高帯域化によるギャップサーボ性能の改善	56
3.4.8 ハイブリッドサーボによるギャップサーボ性能の改善	60
3.5 プルインシステム	61
3.5.1 開発課題	61
3.5.2 ランプ入力型プルイン手法	63
3.5.3 改良型プルイン手法	70
3.5.4 自動プルイン手法	75
3.6 まとめ	76

参考文献.....	78
第4章 チルトサーボ技術	80
4.1 はじめに.....	80
4.2 初期チルト補正.....	80
4.2.1 メカニカルチルトマージン.....	80
4.2.2 初期チルト問題.....	81
4.2.3 初期チルト調整.....	83
4.3 チルト量評価.....	85
4.3.1 ナノギャップチルト量検出手法.....	85
4.3.2 光学式ナノギャップチルト信号の特徴.....	86
4.3.3 ナノギャップチルト量評価.....	89
4.4 チルトサーボシステム仕様.....	92
4.5 チルトサーボシステム	94
4.5.1 チルトアクチュエーター.....	94
4.5.2 タンジェンシャルチルトサーボシステム.....	95
4.5.3 ラジアルチルトサーボシステム.....	97
4.6 3軸アクチュエーターによるギャップサーボシステム.....	98
4.7 チルトサーボ効果.....	100
4.8 チルトエラー信号によるギャップサーボ改善手法	101
4.9 まとめ	104
参考文献.....	105
第5章 コンポーネント改善によるナノギャップ技術.....	106
5.1 はじめに.....	106
5.2 ディスク面共振抑制化手法.....	106
5.2.1 ディスク面共振問題.....	106
5.2.2 ディスク面共振モード	107
5.2.3 ディスク面共振抑制.....	109
5.2.4 ディスク面共振抑制によるギャップ性能改善.....	112
5.2.5 貼り合わせディスクの応用.....	114
5.3 レンズアクチュエーター特性改善化手法.....	115
5.3.1 ピエゾアクチュエーター.....	115
5.3.2 2軸アクチュエーター	118
5.3.3 3軸アクチュエーター	124
5.4 スピンドルモーター特性改善化手法	125
5.4.1 スピンドルモーターによるギャップサーボへの影響.....	125
5.4.2 近接場光ディスクシステム用スピンドルモーター	126
5.4.3 スピンドルモーター改善による効果	128
5.5 まとめ	129
参考文献.....	130
第6章 ダストロバスト化によるナノギャップ技術.....	131
6.1 はじめに.....	131
6.2 エアフローによるナノギャップ安定化.....	131

6.2.1 コニカル型 SIL	131
6.2.2 エアフロー解析	132
6.2.3 ナノギャップへの影響	136
6.3 サーボシステムによるナノギャップ安定化	138
6.4 ヘッドメディアインタフェースによるナノギャップ安定化	141
6.5 ディスクによるナノギャップ安定化	143
6.5.1 SIL 衝突時の技術的課題	143
6.5.2 衝突試験仕様	143
6.5.3 衝突試験機	148
6.5.4 衝突試験結果	149
6.6 メカ機構によるナノギャップ安定化	153
6.7 まとめ	155
参考文献	157
第7章 ナノギャップサーボ技術による記録再生評価	158
7.1 はじめに	158
7.2 ディスク仕様	158
7.3 近接場記録再生システム	160
7.3.1 システム概要	160
7.3.2 記録再生結果	162
7.4 2 ビーム記録再生システム	165
7.4.1 システム概要	165
7.4.2 記録再生結果	167
7.5 リムーバブル近接場光ディスクシステム	167
7.5.1 システム概要	167
7.5.2 システム動作結果	169
7.6 まとめ	169
参考文献	171
第8章 結論	172
謝 辞	175
研究業績	176

第1章 序論

1.1 光ディスクシステムの研究開発動向

1973年にオランダ Philips より、光ディスクドライブシステムの基本概念が発表[1],[2]された。そして、1982年には、ソニーと Philips により世界で初めての光ディスクシステムがコンパクトディスク (Compact Disk ; CD) として商品化された。CD は、当初、音楽データ記録用途として開発されたが、光ディスクの特徴である大容量性、ランダムアクセス性、可搬性、保存性を生かし、コンピューター記憶媒体、映像記録媒体としても応用されるようになった。近年では、インターネットに伴う情報量の増大、テレビ放送のデジタルハイビジョン化や個人映像のハイビジョン化に伴う画像データの増大化が進むにつれて、データ記録メディアとして光ディスクに要求される記録容量が増大する傾向にある。図 1.1.1 に、光ディスクシステムの研究開発動向を示す。

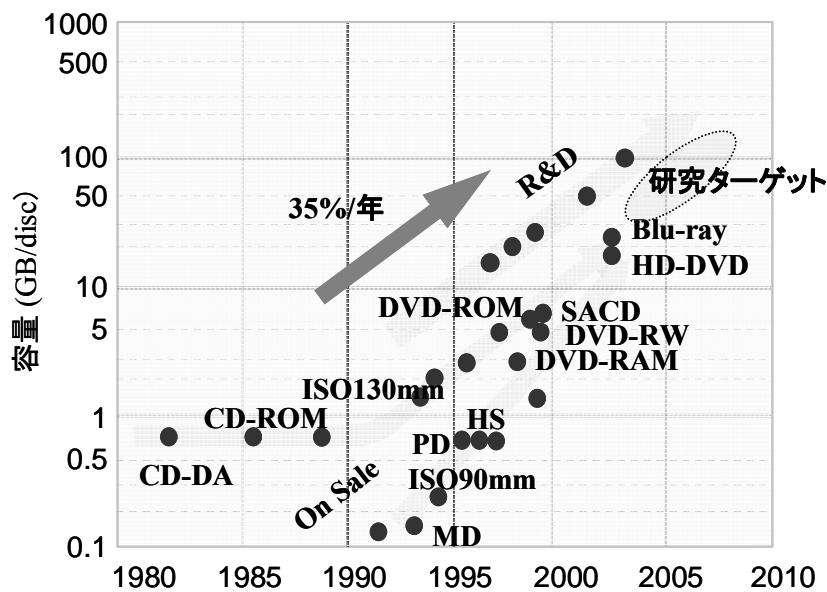


図1.1.1 光ディスクの開発動向

これまでの開発動向によれば、光ディスクの記録容量は年率約 35%の割合で大容量化が進められてきた。それに伴い、システムに要求される転送レートも速くなり、また、応用される用途先も拡大されてきた。

光ディスクシステムの開発の歴史を顧みると、CD が発表されて以来、用途に合わせて様々な光ディスクシステムが開発されてきたが、大きな動向として、CD、ビデオバーサタイルディスク (Digital Versatile Disk; DVD)、そして Blu-ray と発展してきた経緯がある。CD は、音楽データをデジタル化して記録するというニーズを満足するためシステムとして開発された。CD は記録容量 650Mbyte を有し、データ転送レート 1.4Mbps で直径 12cm のディスクに音楽データを 74 分間記録することが可能となっている[3]。光ディスクでは下位互換があることが特徴的であり、CD 以降の光ディスクでは、基本的に CD サイズ、つまり直径 12cm、厚さ 1.2mm というディスク形状が標準となっている。

次世代 CD として、音声データに加えて映像データを記録したいという市場からの要望があり DVD が開発された。DVD では、NTSC 規格のテレビ放送 (720×480 画素) の映像を約 2 時間記録することが可能であり、記録容量、データ転送レートは 4.7Gbyte、11.08Mbps と CD より拡張している。また、次世代 DVD として、ハイビジョン画質の映像を記録したいという市場の要望があり、Blu-ray が開発された。Blu-ray では、デジタルハイビジョン放送 (1920×1080 画素) を約

2 時間記録ことが可能である。標準の記録容量、データ転送レートは、25Gbyte、36Mbps であり、DVD のそれぞれ約 5 倍、約 3 倍となっており、現在、市場に導入されつつある。

しかしながら、将来的には、Blu-ray システムの容量、転送レートでも、いずれ不足することが懸念されている。まず、2011 年までには我が国ではテレビ放送が完全デジタル化される予定となっており、ハイビジョン画質のコンテンツが増大する傾向がある。また、同時に、個人の記録映像もハイビジョン化が進んでおり、ハイビジョンコンテンツの増大化に伴いデジタルデータをアーカイブする需要が大きくなりつつある[4]。映画界においても、アメリカを中心として映画のデジタル配給を進める動きがあり、デジタルシネマフォーマットとして、“Digital Cinema System Specifications V.1.0” [5]が公開されている。本フォーマットによれば、現状のハイビジョン映像の 4 倍の情報量である 4096×2160 画素での映像記録を提唱しており、3 時間分の映像記録に対して、記憶容量 135Gbyte 以上、転送レート 80Mbps 以上である記録媒体を要求している。また、NHK では、ハイビジョン映像の 16 倍の情報量を有するスーパーハイビジョン (7680×4320 画素) システムの研究を進めており、1/50 程度の情報圧縮において、記憶容量 200Gbyte 以上、転送レート 400Mbps 以上の記録媒体を要求している[6]。

以上のような状況から、Blu-ray 以降の次世代光ディスクシステムとして、現在、光ディスクの大容量化に向けた研究開発が活発化している。

1.2 光ディスクの大容量化技術動向

光ディスクは、CD のディスクサイズ、つまり直径 12cm、厚さ 1.2mm が標準となっている。この限られたディスクサイズの中にデジタル情報を高密度に記録する必要がある。

再生専用 (Read Only Memory; ROM) ディスクの場合は、ディスク面上に記録されたピットと呼ばれる凹みの有無でデジタル情報を記録する。また、書き換え可能型 (ReWritable; RW) ディスクの場合は、ディスク面上に予め記録されているグルーブと呼ばれる案内溝に沿ってデジタル情報をマークにより記録する[7]。従って、ピットまたはマーク、及び半径方向のピット間隔またはグルーブ間隔を微細化していくことで大容量化が可能である。しかし、光ディスクでは、これらピットまたはマークにレーザースポットを照射することで再生、もしくはマークを記録するため、デジタル情報を示すピットまたはマークの微小化には限度があり、ディスクに照射するレーザースポットサイズで制限される。従って、光ディスクの大容量化では、レーザースポットサイズを微小化することで大容量化が進められてきた。

記録再生用レーザースポットサイズは、レーザ波長を λ 、対物レンズの開口率を NA で決まり、スポットサイズと λ 、NA とは、次式のような関係にある[8]。

$$Spot \propto \frac{NA}{\lambda} \dots\dots\dots (1.2.1)$$

式(1.2.1)より、レーザースポットサイズを微小化するには、レーザ波長 λ を短波長化し、対物レンズの開口率 (Numerical Aperture; NA) を大きくすればよいことがわかる。そこで、レーザースポットを微小化するために、レーザの短波長化、対物レンズの高 NA 化により大容量化が行われてきた。図 1.2.1 に、例として CD、DVD、Blu-ray (ROM ディスク) の波長 λ 、対物レンズの開口率 NA、ビームスポットサイズ、ピット、トラックピッチを示す。

図 1.2.1 に示すように、CD、DVD、Blu-ray とレーザースポットは微小化され、それに応じて記憶容量も増大している。

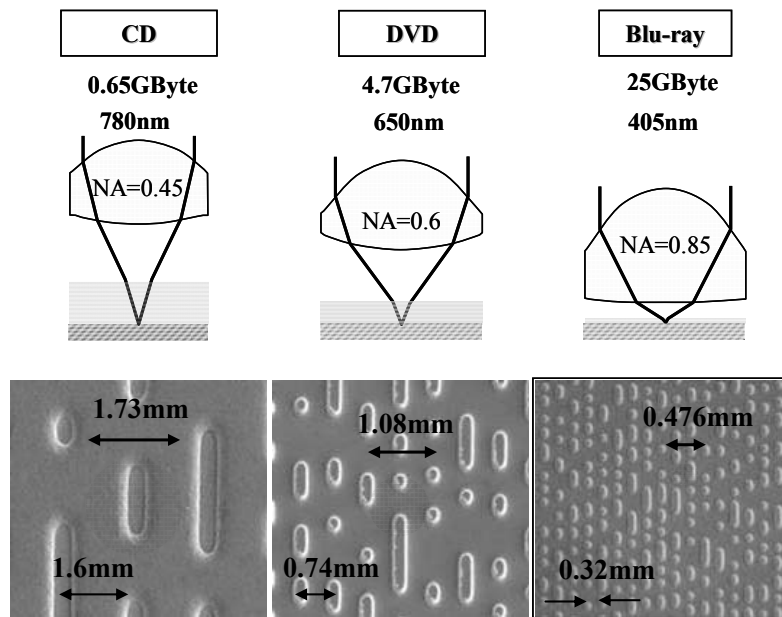


図1.2.1 光ディスクシステムにおける容量、レーザー波長 λ 、開口率NA、ピット、トラックピッチの比較

Blu-ray よりさらに高密度化するためには、レーザー波長を 405nm よりさらに短波長化するか、対物レンズの NA を 0.85 よりさらに大きくする必要がある。しかしながら、現在、実用化されている半導体レーザーは青紫色レーザー（ $\lambda=400\text{nm}$ 程度）が最短であり、これ以上の短波長半導体レーザーは実用レベルではまだ存在しない。また、対物レンズ、光検出器などの光学部品は、波長 400nm 以下では透過率が急激に下がる傾向があり、青紫域より短波長である紫外域において透過率を有する光学部品を新規に開発する必要がある。このため、現状では、Blu-ray で用いられている $\lambda=405\text{nm}$ が実用的なレーザー波長の限界である。

一方、対物レンズの NA は次式で表せる[9]。

$$NA = n \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (1.2.2)$$

ここで、 n は、対物レンズとディスク間のレーザーが伝搬する媒体の屈折率、つまり、空気の屈折率である。空気の屈折率は $n=1$ であることから、式(1.2.2)は、次式のようになる。

$$NA = \sin \theta \leq 1 \quad \dots\dots\dots (1.2.3)$$

つまり、原理的に NA は 1 を超えることができない。言い換えると、 $NA>1$ を超える光は、全て対物レンズ端面で全反射してしまうことを意味している。Blu-ray の NA は 0.85 であり、すでに 1 に近い値となっており、限界に近いと考えられる。ここに、CD、DVD、Blu-ray などの従来の光ディスクにおける“ $NA=1$ の限界”が存在する。このような状況の中でさらなる大容量化を実現するために、図 1.2.3 に示すようないくつかの手法が提案されている。

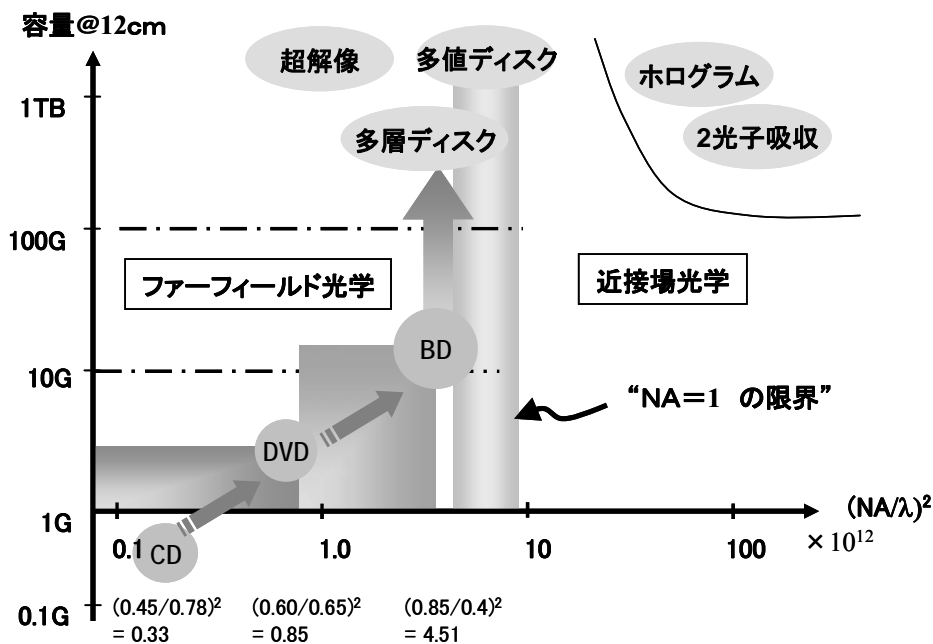


図1.2.3 光ディスクにおける大容量化手法

従来の $NA \leq 1$ での光学システム（ファーフールドフィールド光学系と呼ぶ）の枠組みの中において大容量化するための代表的な技術として、多層化技術、多値化技術、超解像技術がある。

多層化による高密度化手法としては、Blu-ray の光学系を用いて、6 層の追記型ディスクによる 150Gbyte 容量の実現[9]、8 層の ROM ディスクによる 200Gbyte 容量の実現[10]が報告されており、この他、活発に研究開発されている[11][12]。これらの手法では、1 層の Blu-ray ディスク（ディスク容量 25Gbyte）を多段に積層することで高密度化を達成しようとする手法である。しかしながら、本手法では、層間の信号干渉（クロストーク）による各層からの記録信号の SNR の悪化やディスクの厚みによる球面収差による SNR の悪化、サーボ信号への劣化の問題がある。この SNR の悪化のために、積層化する総数に限度があることや、ランダムなデータを読み書きする必要のある RW の多層ディスクの実現が研究課題となっている。層間クロストーク問題に対しては、メディアを工夫することで各層からの反射光を抑制する手法[13]、各層からの信号検出を工夫することで層間クロストークを抑制する手法[14]がある。また、多層時のサーボ信号の劣化問題については、サーボエラー信号を検出する手法を工夫することで回避する手法[15][16]などが検討されている。また、層間クロストーク問題の他に、多層ディスクでは、データ層を積層するために、原則として層分だけディスク製造コストがかかるため、ディスクのコストパフォーマンスが悪化する恐れがあることも指摘されている。

超解像による高密度化手法は、従来から、光磁気ディスクの有力な高密度化手法として提案[17][18][19]され、実用化されており、また、相変化膜を用いた超解像再生の研究も報告されている[20]。最近、再びファーフールド光学系において高密度化する手法として活発に研究開発されている。本手法は、相変化材料に超解像度膜を形成し、ファーフールド光学系においてレーザーをディスクに照射することで光の回折限界を超える集光スポットを記録層に実現し、高密度化を達成する手法であり、“Super-RENS”技術と呼ばれている[21]。本手法の一例として、超解像度膜として厚さ 15nm の Sb 層を設け、この膜にレーザー光を照射することで Sb 膜に回折限界を超えた近接場光を発生させて Sb 膜の近傍の記録層にデータを記録再生するというもの手法がある。しかし、実際に得られる信号の SNR が低いなどの問題点があることから、超解像度膜を Sb 以外の別な

材料による超解像度膜を用いて SNR を改善しようとする研究開発も活発化している [22] [23]。当初、CNR の改善結果の報告が主であったが、最近になり、信号処理を工夫することで RF 信号まで評価した報告[24]や、InSb 膜による超解像度膜を用いたランダム信号結果の報告がされている [25]。しかしながら、いずれも、Blu-ray ディスクの倍密度である 50Gbyte 程度の容量の実現にとどまっているのが現状であり、また、ROM 光ディスクへの応用に限定されている。また、上記の超解像度膜による近接場微小開口の発生メカニズムが明確に解明されていないという問題点もある。

多値化による手法は、例えば、ピットのエッジに複数の記録を持たせる SCIPER (Single Carrier Independent Pit Edge Recording) 記録と 2 次元 PRML (Partial Response Maximum Likelihood) を組み合わせる方式[26]や、深さ方向に変調する方式[27]が提案されている。しかしながら、前者は、50Gbyte 程度の ROM ディスクでの再生信号の確認にとどまり、また、後者は CD、DVD 密度での原理確認にとどまる。多値化による手法では、情報を複数持たせるピットエッジや深さの成形精度の要求が厳しく要求され、高密度化に応じてその難しさは増す。このため、最近では、この手法での高密度化研究は活発化していないのが実情である。

以上のような従来の $NA \leq 1$ でのファーフールド光学系内で高密度化する手法とは全く異なる手法により高密度化をする手法の検討もなされている。代表的には、ホログラム記録による手法、2 光子吸収による手法がある。

ホログラム記録手法では、従来の光記録方法が光の回折現象に基づく手法であるのに対して、光の干渉現象に基づいて記録再生を行う手法である。ホログラム記録手法では、記録時には、記録する信号と参照となる信号をそれぞれ光変調してホログラム材料上で干渉させ、その干渉縞を記録する。そして、再生時には、参照信号に相当する光を、記録時と同一の角度でホログラム材料に照射することで、記録した信号に相当する光を 2 次元的に検出することで再生する。ホログラム記録手法によれば、記録媒体内に体積的に記録できるので、基本的には記録媒体に面記録する回折現象に基づく従来の手法に比べて、記憶容量を飛躍的に高めることが可能である。研究報告として、参照光と記録データ光の光路が別である光学系において、同一参照光に対して記録データ光の位置をシフトさせて記録材料上で干渉させることで多重記録し、100Gbit/in² の記録密度を実現し、記録時で 235Mbps、再生時で 117Mbps での転送レートが実現したとの報告がある[28]。このように記録光と参照光を別軸の光学系にホログラム記録する手法はページ記録方式と呼ばれ、多数の研究報告結果がなされ、活発化している[29][30][31]。ページ記録方式については、参照光と記録データ光を同一光路に配置してホログラム記録するという方式も提案されている[32]。本方式によれば、光学系が従来のファーフールド光ディスクシステムと同様となり、システムの小型化できる点でも有利であることが特徴である。本方式により、230Gbit/in² 密度での記録結果が報告されている[33][34]。この他、ページ記録方式に対して、従来の光ディスクのようにビット記録する方式が提案されている[35][36][37]。本方式では、ホログラム材料内部に、同軸入射された記録光と参照光の干渉を発生させて情報に記録するもので、ページ記録方式と異なり、従来の光ディスクシステムとの互換性を取りやすいシステムであるという特徴がある。

しかしながら、ホログラム記録手法の共通の問題点として、記録再生時において多層記録方式と同様に層間クロストークや球面収差による SNR の悪化の問題や、ホログラム材料の経時的安定性の問題、耐環境変化特性の問題など、記録材料に起因する解決要素が多く残されている。ホログラム記録手法によれば 1Tbyte 以上を達成する可能性を秘めているものの、記録材料の開発に依存しており、実際の 1Tbyte の実現や実用化は不透明であるのが現状である。

2 光子吸収による手法では、従来の光の熱記録による手法ではなく、フォトンモードによる記録を行う[38]。つまり、2 光子吸収することで材料の吸収スペクトルを変化させることで信号を記録する。2 光子吸収による手法によれば、ホログラム記録と同様に記録媒体内に体積的に記録できるので、基本的には記録媒体に面記録する回折現象に基づく従来の手法に比べて、記憶容量を飛躍的に高めることが可能である。記録材料に Al₂O₃ を用いて、記録波長 405nm を用いて 2 光子吸収を

起こさせ、再生には波長 639nm のレーザーにより、2 光子吸収が生じた部分で発生する波長 750nm の蛍光を検出する手法が提案されており[39]、14 層記録の結果を示している。また、単層ながらランダム記録が可能であるとしている。しかしながら、14 層記録の場合の容量は CD 以下にとどまり、ランダム記録の場合においても、単層記録のみであり、CD の 1/2 以下の容量で、転送レートも 6.5Mbps と DVD の 1/2 程度である。この他、別の材料による 2 光子吸収記録の報告[40]やロールタイプメディアを用いた報告[41]、DVD と同様なディスク構造による報告[42]などがなされている。しかしながら、2 光子吸収による手法の共通問題として、2 光子吸収を効率よく生じさせる記録材料の問題、層間の信号干渉の問題などホログラム記録手法と同様にメディア材料上の解決すべき問題が多い上に、2 光子励起を生じさせるためにフェムト秒レーザーが必要であり、蛍光検出を行う光学系が別途用意する必要があるなどシステムの解決すべき点も多い。

以上のように、多層化技術、多値化技術、超解像技術による高密度化手法は、従来の光ディスク（ファーフールド光学系）の枠組みの中で高密度化を図ろうとする手法であり、一方のホログラム記録、2 光子吸収による手法は、光の波長 λ と対物レンズの開口率 NA で容量が決まる従来の光の回折現象に基づく手法から脱却して、光の別の性質である干渉現象、フォトンモードにそれぞれ基づいて高密度化を図ろうという手法である。

以上のような手法とは別に、従来のファーフールド光学系と同様に光の波長 λ と対物レンズの開口率 NA で容量が決まる従来の光の回折現象に基づく手法に基づきながら、近接場光学系を導入することで、ファーフールド光学系の“NA=1 の限界”を超える手法がある。本手法によれば、従来の CD、DVD、Blu-ray 等の光ディスクで蓄積された技術をそのまま生かせることが可能であり、また、NA を 1 以上にする事で光のスポットサイズを従来の光ディスク以上に微小化することが可能であり、ディスク容量をさらに大容量化することが達成できる。

1.3 近接場光による高密度化手法

従来の回折現象に基づく方法では対物レンズの NA が 1 を超えられないことが問題であった。しかしながら、光の近接場現象を利用することにより、回折限界を超える $NA > 1$ の光を対物レンズから取り出すことが可能である。この光学システムを従来のファーフールド光学系に対して、近接場光学系と呼ぶ。近接場光学系により得られる $NA > 1$ の光を近接場光と呼び、この近接場光を用いることで集光スポットを微小化することにより、光学顕微鏡の解像度を上げる手法が提案されている[43]。これは、STM(Scanning Tunneling Microscope; 走査トンネル顕微鏡)技術を用いて、小開口から出射した光を試料表面に光の波長の 1/4 程度以下に近接することにより、回折限界を超える光が対物レンズと試料間の近接場結合により対物レンズを透過する現象を利用することにより高解像度を達成しようとするもので、SNOM (Scanning Near-field Optical Microscope) 技術と呼ばれるものである。

SNOM 技術により、光磁気記録膜に 60nm の磁気ドメインを記録し 100Gbit/in² 程度の密度の実現可能性が報告されている[44]。また、相変化記録膜に 60nm の相変化マークを記録し 100Gbit/in² 程度の密度の実現可能性が報告されている [45]。しかしながら、このような SNOM 技術に基づく手法 (SNOM 型) では、記録マークを微小化し大容量化が可能であるものの、これらの文献[44][45]でも指摘されているように微小開口から近接場光の伝達効率が 10^{-4} 程度以下と非常に低い上に、開口径がプローブ開口径で決まってしまうという問題がある。このため、プローブを微小化する必要があり、現実的には非常に困難である。さらに、光ヘッド部がプローブ構造であるため、従来の光ディスクシステムで用いられているような分離光学系と異なり、光ピックアップ部と当該光ピックアップ部に光を集光させる光学系が一体となっている。このため、光ピックアップ部の重量が、対物レンズからなる分離光学系の場合と比較して増えてしまい、ディスク面ぶれに追従するためのサーボ帯域が高々数 kHz 以下しか確保できず、転送レートが上げることが困難であるという問題がある。

一方、上記 SNOM 型の問題点を克服するために、従来の光ディスクと同様なレンズ光学系を用

いる方法が提案されている[46]。このシステムは、固体浸レンズ（Solid Immersion Lens, SIL）を浮上スライダに乗せて、SIL 端面から出射した光を試料表面に光の波長の 1/4 程度以下に近接することで近接場光を発生させ、高解像度を達成するものである。また、SIL を光ディスクシステムのピックアップに応用することで、従来の光ディスクシステムの回折限界を超える近接場光による微小スポットを実現し光学的高解像度を得る手法が提案されている[47]。以下、SIL を用いて近接場光を発生させるシステムを SIL 型と呼ぶ。SIL 型によれば、ディスクに照射されるスポット径は、従来の光ディスクと同様に NA と λ で決まる。また、SNOM 型と異なり従来の光ディスクシステムと同様な平行光学系にすることで広視野角度を実現でき、また、光利用効率も 90% 程度と極めて高い。また、従来の光ディスクと同様に対物レンズを用いた分離光学系であるので、光ピックアップ重量が数 100mg と軽量でありアクセス速度の点でも有利となる。さらに、SIL とディスク間がナノギャップであること以外は、従来の光ディスクと同様であり、従来の光ディスク技術がそのまま応用できるという大きな利点がある。

しかしながら、SIL 型近接場光ディスクシステムは上記のような利点があるものの、対物レンズとディスク間が数十 nm 以下であり、かつナノ精度を要求されるという原理的な問題点がある。従って、ディスクの可搬性を生かした上で、このナノギャップをいかに安定に保持するかが、近接場光ディスクシステムの実現における大きな技術的課題となっている。

1.4 SIL 型近接場光ディスクシステムにおけるナノギャップ問題

近接場光ディスクシステムは、近接場光を用いて記録再生を行うため、SIL とディスク間の距離（動作距離）が数十 nm 程度と極めて近接させることが要求される。図 1.4.1 に、従来の光ディスクシステムを含めた動作距離の比較を示す。

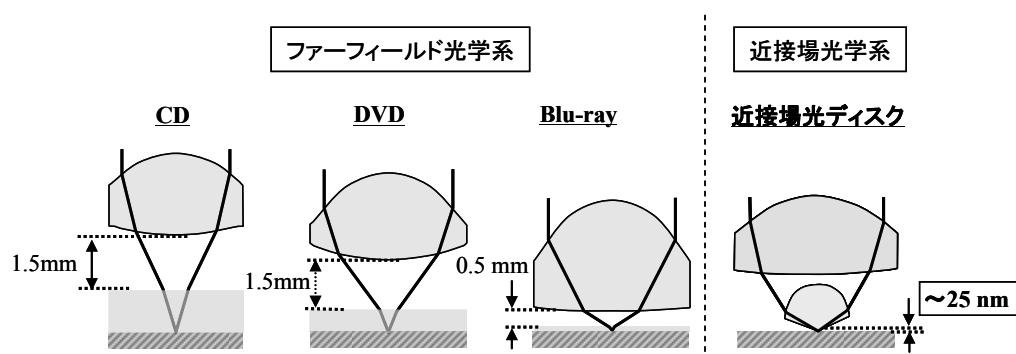


図1.4.1 光ディスクにおける動作距離の比較

光ディスクの大容量化による対物レンズの高 NA 化により、レンズとディスク間の動作距離は短くなっていく。CD では動作距離は 1.5mm 程度であり、約 1.2mm のカバー層を通してディスク内部の信号層に光スポットが照射される。DVD では動作距離は CD と同様に 1.5mm 程度であるが、NA を CD の 0.45 から 0.6 に大きくしたことに応じて焦点距離も小さくなるため、カバー層を 0.6mm と薄くしている。Blu-ray では、さらに NA を 0.85 と上げたため、動作距離が DVD よりもさらに短く 0.5mm 程度となることからカバー層を 0.1mm としている。一方の近接場光ディスクシステムでは、動作距離は 25nm 程度であり、カバー層は $1\mu\text{m}$ 程度となっている。つまり、CD、DVD、Blu-ray などのファースフィールド光ディスクシステムと比較して、近接場光ディスクシステムの動作距離は極めて短く、むしろハードディスクに近い動作距離となっている。

ハードディスクでは、ギャップを維持するのにサーボは行っておらず、回転により生じる空気流によりヘッドを浮上させてギャップ、チルトを維持している。安定浮上のためにヘッドが 1mg 程度と軽量化されているが、ディスクとの対向面積は、浮上圧を維持するためにピコスライダと呼ば

れるものでも $1\text{mm} \times 1.25\text{mm}$ 角程度は必要である[48]。このため、ダストの影響を受けやすく、また、空気流のみでギャップを維持する構造であることから、ヘッドの安定浮上のために面ぶれも抑制する必要がある。このため、ディスク基材としてガラスを用いることで数 μm 以下に抑制してある。また、ダストにより空気流が乱れると、ヘッドがディスクに衝突し、ヘッドやディスクダメージのためにディスク浮上が困難になることから、基本的にディスクはドライブシステムに対して固定されており外部に取り出すことはできない構造になっている。

一方のSIL型近接場光ディスクでは、フライングヘッド型とアクチュエーター型が提案されている。フライングヘッド型は、ハードディスクと同様に、フライングヘッドにSILを組み込み、ディスク回転によりヘッド部に生じる空気によるエアベアリング効果により浮上させ、ギャップを近接場光が発生する距離に維持ものである。光磁気ディスクに応用したもの[49][50][51]と、相変化ディスク応用したもの[52][53]がある。本手法によれば、空気圧によりギャップを一定に保持するため、ギャップエラーを検出する必要はなく、適当なディスク回転数に制御することでギャップ量を維持し近接場光を発生できるため、初期の近接場光ディスクシステムの研究では比較的によく用いられていた。しかしながら、フライングヘッドによる手法では、ハードディスクと同様に面ぶれ量、ダストの観点で、安定浮上のためのディスクとヘッドのインタフェース管理が厳しくなり、光ディスクシステムの利点であるディスクの可搬性の利点が失われてしまう。例えば、米Terastor社は、フライングヘッド方式を採用し、1998年頃に5.25inchサイズで当時最大の20Gbyte容量の光磁気ディスクの開発を目指していたが[54]、実用化されることなく開発を断念した経緯がある。このため、従来のフライングヘッド型による研究では、SIL型近接場光による高密度化の実現可能性についての研究が主であり、ディスク面ぶれを抑制、もしくはダストの影響がないクリーンルームで行った実験が主であり、光ディスクシステムの特徴であるディスクの可搬性能を含めた研究開発は十分になされてきたとは言えない状況であった。

一方、アクチュエーター型については、SILを直接的にアクチュエーターにより駆動し、サーボを行うことで近接場光が発生する距離にギャップを一定に維持するものである。この手法では、ナノ精度でギャップを検出するギャップエラー検出手法と、ギャップを一定に維持するサーボ技術が重要となる。この手法に基づくものとして、従来の光ディスクと同様なボイスコイルモーター(VCM)型アクチュエーターにSILを搭載し、SILとディスク間に生じる静電容量をギャップエラーとして用いることで、ギャップを保持するシステムが報告されている[55][56]。本手法によれば、可動範囲が広く、広い周波数帯域が確保できるVCM型アクチュエーターを用いているため、面ぶれ量に対する許容量が広がり光ディスクシステムに対して有望である。しかしながら、本手法による研究報告でも、フライングヘッド型システムと同様に、SIL型近接場光システムによる高密度化の実現可能性についての研究が主であった。つまり、ダストの影響がないクリーンルームで行った結果が主であり、また、ディスク面ぶれ量に対する検討も含めた光ディスクシステムの特徴であるディスクの可搬性能を含めた研究開発は十分になされてきたとは言えない状況であった。

以上な状況から、近接場光ディスクシステムにおいて、安定したナノギャップを実現する技術が強く求められている。特に、光ディスクは、リムーバブル性能が求められていることから、ディスク面ぶれ量を広く許容し安定したナノギャップを実現するドライブロバスト性、及びダストに対しても安定してナノギャップを実現するダストロバスト性が求められている。

本研究は、このような背景でなされたものである。

1.5 本研究の目的及び構成

本研究は、SIL型近接場光ディスクシステムにおいて、特に対物レンズと光ディスクをレーザー波長以下のナノギャップに維持する技術(ナノギャップ技術)に関してなされたものであり、ドライブ性能の観点、及びダストロバスト性の観点からナノギャップ技術について論じたものである。

以下に、本論文の構成を示す。

第1章では、光ディスクシステムの開発動向、大容量化技術動向について述べ、本論文の研究テーマである近接場光ディスクシステムの従来研究における問題点、及び本研究の目的を述べる。

第2章では、本研究の対象である近接場光ディスクシステムについて述べる。本章では、まず、SILを用いた近接場技術、及び光学解像度の改善効果について述べる。そして、当該SILを用いた近接場光ディスクシステムの基本構成について述べる。

第3章、第4章では、近接場光ディスクシステムにおいてナノギャップを安定して維持するための技術について述べる。

第3章では、まず、ナノ精度でギャップエラーを検出する手法について述べる。次に、当該エラーに基づき、ナノ精度で高精度、高速に近接場状態に引き込み、かつ維持するナノギャップサーボシステムについて述べる。そして、この技術を用いて高密度化、高転送レート化を実現する安定したナノギャップ保持が可能であることを実証する。

第4章では、ギャップサーボシステムを補完する技術であるチルトサーボシステムについて述べる。第3章で述べたギャップエラーを利用した独自のチルトエラー検出手法について述べ、光ディスクにおける円周方向と半径方向の両軸のチルトサーボ手法を述べる。また、当該チルトエラーを用いた独自のギャップサーボを高精度化する手法についても述べる。

第5章では、近接場光ディスクシステムを構成するコンポーネントの観点からのナノギャップサーボの高精度化技術について述べる。本章では、レンズアクチュエーターが追従すべき対象かつ外乱源である“ディスク”、ナノギャップを維持するうえでの制御対象である“レンズアクチュエーター”、ディスクによる外乱の誘発源である“スピンドルモーター”に着目する。それぞれがナノギャップシステムに及ぼす影響、及びそれらを改善することによるナノギャップ精度の改善効果について述べる。

第6章では、ダストに対するナノギャップ安定性について述べる。本章では、まず、近接場光ディスクシステムにおけるダストの影響について述べる。そして、当該影響の抑制のために、エアフロー、サーボ、メディスク、メカの各観点からナノギャップ安定性化技術について述べる。

第7章では、前章までに述べてきたナノギャップ技術による近接場記録再生結果について述べる。まず、1ビームによる近接場光記録再生結果を示し、近接場光による高密度、高転送レートでの記録再生が可能であることを実証する。次に、2ビームによる近接場光記録再生結果を示し、2ビーム化による近接場光による同時記録再生結果を示し、2ビーム化による高転送レート化を実証する。最後に、ローディング機構を備えた近接場光ディスクシステムについて検討し、近接場光を用いた光ディスクでのリムーバブル動作を実証する。

第8章では、本論を通して検討したSIL型近接場光ディスクシステムのナノギャップシステムについてのナノギャップ技術について総括する。

以上、本論文の構成を述べたが、図1.5.1に各章の関係を示す。まず、第1章にて本研究の背景と目的を示し、第2章で本研究対象である近接場光ディスクシステムについて概要を示す。そして、第3章にてドライブの観点からのリムーバブル技術として、従来の光ディスクと比べて格段に要求精度が厳しくなるギャップサーボ技術について述べ、第4章にてディスクの全面記録再生の実現の観点からチルトサーボ技術について述べる。第5章では、これらを実現するための要素技術としてシステムを構成するコンポーネント改善によるナノギャップ技術について述べる。第6章では、

第3章～第5章とは異なり、ダストに対するロバスト性の観点からナノギャップ安定化技術について述べる。第7章では、これらのナノギャップ安定化技術を用いて実現された安定な近接場光による高密度、高転送レートによる記録再生結果について述べ、最後に第8章にて本研究を総括する。

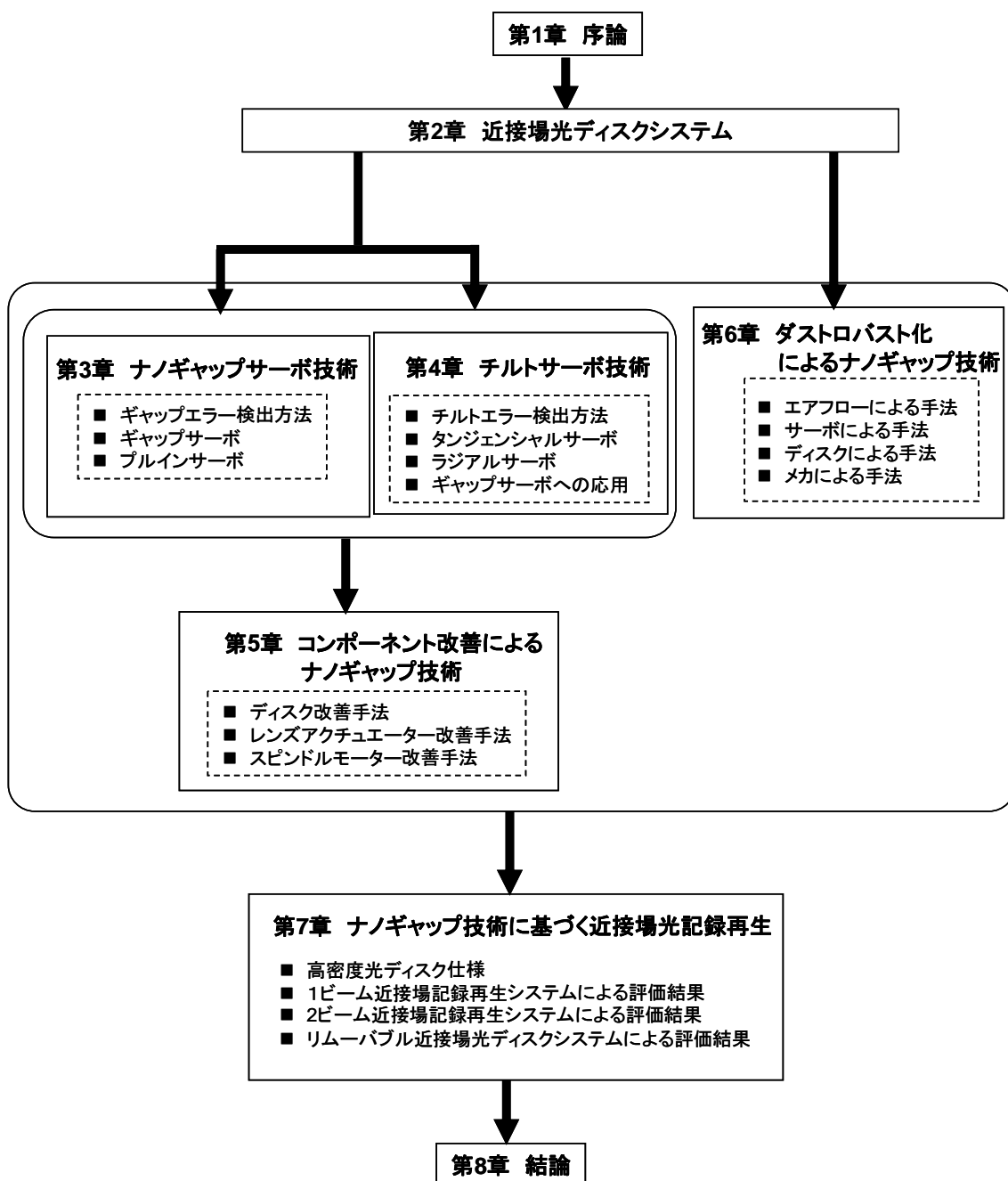


図1.5.1 本論文の構成

参考文献

- [1] K.Compaan and P.Kramer, “The Philips ‘VLP’ system”, Philips Tech. Rev. **33**, No.7, pp.178-180 (1973)
- [2] P.J.M.Janssen and P.E.Day, “Control mechanisms in the Philips ‘VLP’ record player, Philips Tech. Rev. **33**, No.7, pp.190-193 (1973)
- [3] 中島平太郎、小川博司、“コンパクトディスク読本”、オーム社 (1988)、pp.75-82
- [4] “見えなくなる光ディスク、長期保存が主要用途に”、日経エレクトロニクス、Vol.899, pp. 51-58 (2005.8.1)
- [5] Digital Cinema Initiatives LLC, ”Digital Cinema System Specification V1.0”, pp. 52 (2005)
- [6] 徳丸春樹、“光ディスクの高速化技術”、NHK R&D、No.97、pp. 24-31 (2006)
- [7] 浮田宏生、“オプトメカトロニクス”、森北出版社(2001)、pp. 71-86
- [8] 左貝潤一、“光学の基礎”、コロナ社 (1997)、pp. 75
- [9] K.Mishima, D.Yoshitoku, H. Itoh, T.Kikukawa, S.Yamatsu, H.Inoue, T.Komai, K.Tanaka, and T.Aoi, “150GB, 6-layer write once disc for Blu-ray Disc system” , Proc. SPIE vol.6282, I1-I11 (2001)
- [10] I.Ichimura, K.Saitoh, T.Yamasaki, and K.Osato, “Proposal for a multilayer read-only-memory optical disk structure”, Appl. Opt. **45**, pp. 1794-1803 (2006)
- [11] N.Shida,T.Higuchi,Y.Hosono, H.Miyoshi, A.Nakano, and K.Tsuchiya, “Multilayer optical read-only-memory disk applicable to Blu-ray disc standard using a photopolymer sheet with recording capacity of 100GB”, Jpn. J. Appl. Phys. **43**, pp. 4983-7986 (2004)
- [12] H.Kitaura, K.Hisada, K.Narumi, K.Nishiguchi, and N.Yamada, “Multi-layer Write-once Media with Te-O-Pd Films utilizing a Violet Laser”, Proc. of SPIE vol.4323, pp. 340-347 (2002)
- [13] A.Hirotsume, J.Ushiyama, Y.Miyauchi, N.Endo, T.Shintani, T.Kurokawa, T.Sugiyama, Y.Anzai, and H.Miyamoto, “Interlayer Crosstalk Reduced Multilayer Disk with Wide Fabrication Margin”, Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory, pp. 72-73 (2007)
- [14] H.Mikami, T.Shimano, H.Kubo, J.Hashizume, H.Miyamoto, “Readout-Signal Application by Homodyne Detection Scheme”, Proc. of SPIE vol.6620, 662005-1 - 662005-8 (2007)
- [15] 西紀彰、中野文昭、植村嘉門、“1 ビーム分割パターン可変方式の開発”、信学技報、CPM2006-86, pp. 41-46 (2006)
- [16] K.Sano, F.Yamasaki, A.Arai, S.Kadowaki, “Novel One-Beam Tracking Detection Method for Dual Blu-ray Discs”, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, No.2B, pp. 1174-1177 (2006)
- [17] K.Aratani, A.Fukumoto, M.Ohta, M.Kaneko, and K.Watanabe, “Magnetically induced super resolution in novel magneto-optical disk”, Proc. of SPIE 1499, pp. 209 - 215 (1991)
- [18] H.Awano, A.Yamaguchi, S.Sumi, S.Ohnuki, H.Shirai, N.Ohta and K.Torazawa, “Magnetic domain expansion readout for amplification of an ultra high density magneto-optical recording signal”, Apl.Phys.Lett. 69, No.27, pp. 4257- 4259 (1996)
- [19] T.Shiratori, E.Fujii, Y.Miyakoka, and Y. Hozumi, “HIGH-DENSITY MAGNETO-OPTICAL RECORDING WITH DOMAIN WALL DISPLACEMENT DETECTION”, J.Magn.soc.Jpn, vol.22 suppl. No.S2, pp. 47 - 50 (1998)
- [20] K.Yasuda, M.Ono, K.Aratani, A.Fukumoto, and M.Kaneko, “Premastered Optical Disk by Superresolution”, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, No.11B, pp. 5210-5213 (1993)
- [21] J.Tominaga, T.Nakano, and N.Atoda, “An approach for recording and readout beyond the

- diffraction limit with a Sb thin film”, Appl. Phys. Lett. **73**, No. 15, pp. 2078-2080 (1998)
- [22] M.Yamamoto, G.Mori, H.Tajima, N.Takamori, and A.Takahashi, “Super-Resolution Optical Disc with High Readout Stability Using a Zinc Oxide Thin Film”, Jpn. J. Appl. Phys. **43**, No.7B, pp. 4959-4936(2004)
 - [23] H.Kim, J.Kim, C.Rark, M.Jung, M.Ro, and I.Park, “Random Signal Characteristics of Super Resolution Near Field Structure Rea-Only Memory Disc”, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, No.2B, pp.1374-1378 (2006)
 - [24] R.Kasahara, T.Ogata, T.Kawasaki, H.Miura, and K.Yokoi, “Decision Feedback Partial Response Maximum Likelihood for Super-Resolution Media”, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, No.6B, pp.3878-3881 (2007)
 - [25] B.Hyot, F.Laulagnet, O.Lemonnier, and A.Fargeix, “Super-Resolution ROM Disc with a Semi-Conductive InSb Active Layer”, Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory, pp.12-13 (2007)
 - [26] H.Hayashi, N.Minagawa, T.Goto, H.Fujimoto, K.Saito, M.Kaneko, “High Density ROM disk System by Multilevel Recording”, Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory Tech. Digest, We-E-08 (2003)
 - [27] F.H. Lo, J.W. Kuo, N.H. Tseng, J.J.Ju, and D. Howe, “Recording of Multi-Level Run-Length-Limited Modulation Signals on Compact Disc/Digital Versatile Disc Rewritable Discs”, Jpn. J. Appl. Phys. **43**, No.7B, pp.4852-4855 (2004)
 - [28] K.Anderson, E.Fotheringham, A.Hill, B.Sissom, and K.Curtis, “High speed holographic data storage at 100 Gbit/in²”, Tech. Digest of Optical Data Storage, ThE2 (2005)
 - [29] E.Chuang, k.Curtis, Y.Yand, and A.Hill, “Comsumer Holographic ROM Reader with Mastering and Replication Technology”, Tech. Digest of Optical Data Storage, pp.224-226 (2006)
 - [30] T.Ito and A.Okamoto, “Volume Holographic Recording Using Spatial Spread-Spectrum Multiplexing”, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, No.2B, pp.1270-1276 (2006)
 - [31] T.Ando, M.Ono, K.Ozaki, and K.Oishi, “Holographic Data Storage Media Employing Phase-Change Reflector”, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, No.6B, pp.3855-3857 (2007)
 - [32] H.Horimai, X.Tan, and J.Li, “Collinear holography”, Appl. Optics, Vol.44, No.13, pp.2575-2579 (2005)
 - [33] K.Tanaka, H.Mori, M.Hara, K.Hirooka, A.Fukumoto, and K.Watanabe, “High density recording of 270 Gbits/inch² in a coaxial holographic storage system”, Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory, pp. 38-39(2007)
 - [34] N.Hayashida, A.Kosuda and J.Yoshinari, “A New Organic/Inorganic-Hybrid Photoreactive Material for Holographic Data Storage Media”, Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory , pp. 44-45(2007)
 - [35] R.R.MacLeod, A.J.Daiber, M.E.MacDonald, T.L.Robertson, T.Slagle, S.L.Sochava, and L.Hesselink, “Microholographic multilayer optical disk data storage”, Appl. Opt., Vol.44, No.16, pp.3197-3207 (2005)
 - [36] P.Wu, X.Shi, B.Lawrence, Z.Ren, J.Smolenski, C.Erben, E.Boden, and Kathryn Longley, “Micro-holograms Recording in a New Thermoplastic Medium for Holographic Data Storage”, Proc. of SPIE 6282, 62821B1-62821B6/62821B7 (2006)
 - [37] T.Horigome, K.Saito, H.Miyamoto, K.Hayashi, G.Fujita, H.Yamatsu, N.Tanabe, S.Kobayashi, and H.Uchiyama, “Recordign Capacity Enhancement of Micro-reflector Recording”, Tech. Digest of Optical Data Storage , pp.34-35 (2007)

- [38] Y.Kawata, "Volumetric Multilayered Optical Memory for High Density Data Storage", International Symposium on Optical Memory, Short Coerces Lecture Notes (2007)
- [39] M.S.Akselrod, "Multilayer Recording and Dynamic Performance of Volumetric Two-Photon-Absorbing Fluorescent Al_2O_3 Media", Jpn. J. Appl. Phys. **46**, No.6B, pp.3902-3905 (2007)
- [40] T.Tanaka, K.Yamaguchi, and S.Yamamoto, "Rhodamin-B-doped and Au(III)-doped PMMA film for three-dimensional multi-layered optical memory", Opt. Commun. **212**, pp. 45-50 (2002)
- [41] M.Miyamoto, A.Ohta, Y.Kawata, and M.Nakabayashi, "Proposal of Roll-Type Optical Advanced Memory", Jpn. J. Appl. Phys. **46**, No.6B, pp.3886-3888 (2007)
- [42] O.M.Alpert, A.N.Shipway, Y.Takatani, K.Nakao, O.Eytan, D.Leigh, and M.Arise, "Dynamic Two-Photon Recording and Readout of Over 100 Layers of Data", Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory, pp. 76-77 (2007)
- [43] U.During, D.W.Pohl, and F.Rohner, "Near-field optical-scanning microscopy", J.Appl.Phys., **59**, No.10, pp.3318-3327(1986)
- [44] E.Betzig, J.K.Trautman, R.Wilfe, E.M.Gyorgy, P.L.Finn, M.H.Kryder, and C.H.Chang, "Near-field magneto-optics and high density data storage", Appl.Phys. Lett., **61**, No.2, pp.142-144 (1992)
- [45] S.Hosaka, T.Shintani, M.Miyamoto, A.Hiotsune, M.Terao, M.Yoshida, K.Fujita, and S.Kammer, "Nanometer-Sized Phase-Change Recording Using a Scanning Near-Field Optical Microscope with a Laser Diode", Jpn. J. Appl. Phys., **35**, No.1B, pp.443-447 (1996)
- [46] S.M. Mansfield and G.S. Kino, "Solid immersion microscope", Appl. Phys. Lett., **57**, No.24, pp.2615-2616 (1990)
- [47] S.M.Mansfield, W.R.Studenmund, G.S. Kino, and K.Osato, "Highe-numerical-aperture lens system for optical storage", Opt.Lett. **18**, No.4, pp.305-307 (1993)
- [48] 岡村博司, "ハード・ディスク装置の構造と応用", CQ 出版, pp.53 (2002)
- [49] B.D.Terris, H.J.Mamin, and D.Rugar, "Near-field optical data storage", Appl. Phys.Lett., **68**, No.2, pp141-143 (1996)
- [50] Y.V.Matynov, F.Zijp, F.C.Pennig, B.van Rompaey, R.J.M.Vullers, H.W. van Kesteren, C.A. Verschuren, M.A.H. van der Aa, H.Awano, and N. Ohta, "High-density first surface magneto-optical recording using blue laser, high numerical aperture objective and flying slider", Tech. Digest of Optical Data Storage, pp.52 -54 (2004)
- [51] S.Kim, Y.Kim, J.M.Park, J.Y.Kim, and J.H.Kim, "Effective Design and Performance of an Optical Flying Head for Near-Field Recording", Jpn. J. Appl. Phys., **41**, No.3B, pp.1884-1888 (2002)
- [52] 水野 剛、一杉 太郎、小島 直人、山崎 茂、酒匂 景康、渡辺 健次郎, "近接場光記録システム用光浮上ヘッド", 信学技報 CPM2001-74, pp.19-24 (2001)
- [53] T. Mizuno, N. Kojima, T. Hitosugi, K. Sako and K. Watanabe, "An optical configuration based on flying head structure for near-field recording", Jpn. J. Appl. Phys., **43**, No.4A, pp. 1403-1409 (2004)
- [54] 日経エレクトロニクス, "HDD と VTR の将来形をねらう光ディスク装置", No.718 pp.47 (1998.6.15)
- [55] I.Ichimura, K.Kishima, K.Osato, K.Yamamoto, Y.Kuroda, and K.Saito, "Near-Field Phase-Change Optical Recording of 1.36 Numerical Aperture", Jpn. J. Appl. Phys., **39**, No.2B, pp.962-967 (2000)

- [56] I.Ichimura, K.Kishima, K.Saito, K.Yamamoto, Y.Kuroda, A.Iida, S.Masuhara, and K.Osato,"Near-Field Optical Recording on Pre-Grooved Phase-Change Disk in the Blu-Violet", Jpn. J. Appl. Phys., **40**, No.3B, pp.1821-1826 (2001)

第2章 近接場光ディスクシステム

2.1 はじめに

本章では、本研究対象である固体浸レンズ (Solid Immersion Lens ; SIL) 型近接場光ディスクシステムの基本構造について述べる。まず、SIL を用いて実現される近接場現象及び、SIL による光学解像度の改善効果について述べる。そして、本研究対象である近接場光ディスクにおけるナノギャップ技術の検討を行ったシステムの基本構成について述べる。

2.2 SIL による近接場技術

光ディスクシステムのレンズ光学系において、対物レンズとディスク間の距離が光の波長よりも十分に離れている場合、図 2.2.1 に示すように対物レンズの端面は空気と接することになる。

レンズの屈折率を n_1 、空気の屈折率を n_2 とすると、対物レンズ端面に角度 i で入射した光と対物レンズから角度 r で出射した光は、スネルの法則により式 (2.2.1) に示す関係が成立する[1]。

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin r} \quad \dots\dots\dots (2.2.1)$$

従って、次式が導かれる。

$$i = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \cdot \sin r \right) \quad \dots\dots\dots (2.2.2)$$

$r \geq 90$ (deg.) となる場合、入射した光はレンズ端面で全反射する。例えば、対物レンズがガラスからなる場合、ガラスの屈折率 $n_1=1.5$ 、空気の屈折率 $n_2=1$ より、全反射を起こす最小の入射角は式 (2.2.2) より、次式のようになる

$$i = \sin^{-1} \left(\frac{1}{1.5} \cdot \sin 90 \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1}{1.5} \right) \approx 42(\text{deg.}) \quad \dots\dots\dots (2.2.3)$$

つまり、対物レンズ (ガラス) から空気に光が入射する場合、42 度の角度以上で入射した光はレンズの端面で全反射するため、対物レンズ外では観察することができない。

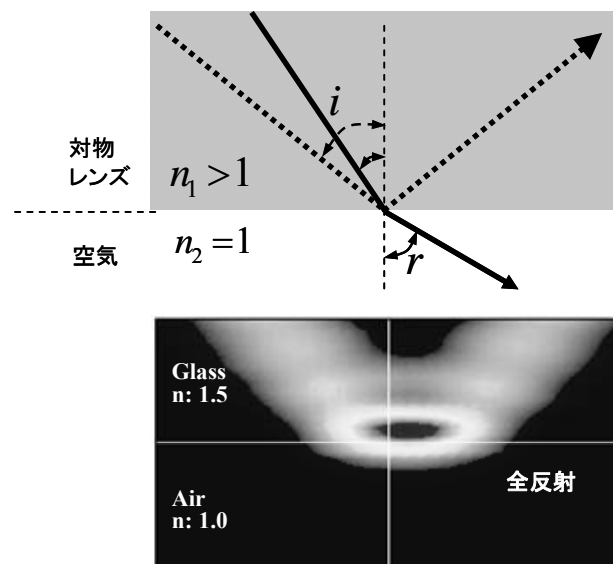


図2.2.1 ファーフィールド時の全反射光の様子

一方、対物レンズの開口率 (Numerical Aperture; NA) は、平行光を対物レンズに入射したときの対物レンズから出射する光の角度を、図 2.2.2 に示すように θ とすると、式 (2.2.4) により定義される。

$$NA = n_2 \sin \theta = 1 \cdot \sin \theta = \sin \theta \geq 1 \quad \dots\dots\dots (2.2.4)$$

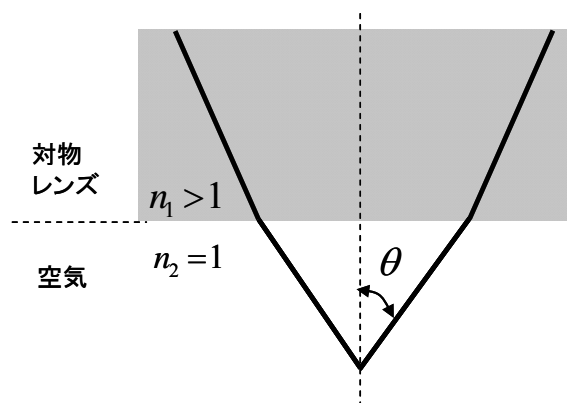


図2.2.2 対物レンズの開口率NA

従って、高屈折率の対物レンズにより、例えば、図 2.2.1 の例で 42 度を超える角度でレンズ端面入射した光、つまり $NA > 1$ の成分の光はレンズ内部では観察できるが、レンズ端面で全反射されるためにレンズ外では観察することはできない。以上より、通常の光ディスクシステムのレンズ光学系では、レンズ端面から光を取り出すための開口率は $NA \leq 1$ となる。これは、式(2.2.4)による NA の定義からも明らかである。これが、ファーフィールド系における “ $NA=1$ の限界 “である。

ところが、対物レンズとディスク間の距離を光の波長 λ の 1/4 以下に近接すると、図 2.2.1 で示したファーフィールド光学系とは異なる挙動を示す。これを図 2.2.3 に示す。

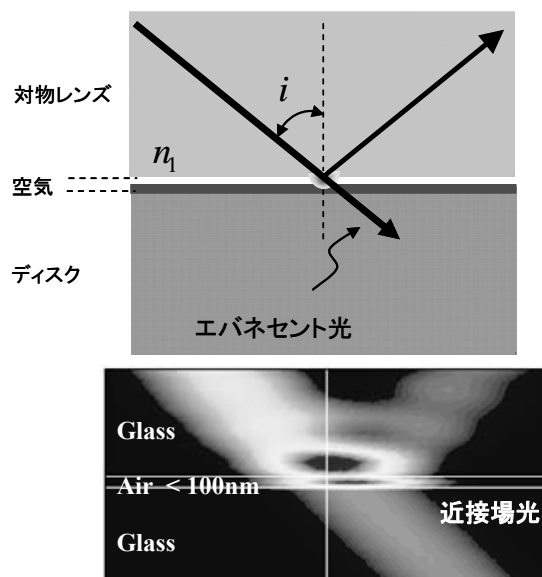


図2.2.3 近接場時の全反射光の様子

レンズの端面がディスクに $\lambda/4$ 以下の距離に近接すると、対物レンズとディスク間でエバネセント結合あるいは近接場結合と呼ばれる光のトンネル現象が生じ、今までレンズの端面で全反射した

光の一部が、レンズの端面を突き抜けてディスク側に透過してくる[2]。この光はエバネセント光あるいは近接場光と呼ばれる。近接場光は、図 2.2.1 において対物レンズ端面で全反射を起こす入射光成分であり、 $NA > 1$ の光の成分である。このように、近接場状態では、回折限界を超える $NA > 1$ の光を対物レンズの端面から近接場光という形で取り出し利用することが可能となる。

図 2.2.3 に示すように回折限界を超えた近接場光を用いて情報を記録再生する光ディスクシステムを近接場光ディスクシステムと呼ぶ。

2.3 SIL 型近接場光ディスクシステムの光学解像度

SIL 型近接場光学ピックアップ部を図 2.3.1 に示す。SIL 型近接場光ディスクシステムにおける対物レンズは、非球面对物レンズと SIL を組み合わせた 2 群レンズ構成となっている。非球面レンズに入射した光は、非球面レンズの開口率を NA とすると、対物レンズは空気（屈折率=1）に接していることから、式 (2.2.4) より $NA = \sin \theta$ の成分の光が対物レンズ端面より出射される。この光が後段の SIL（屈折率= n ）に入射することになる。

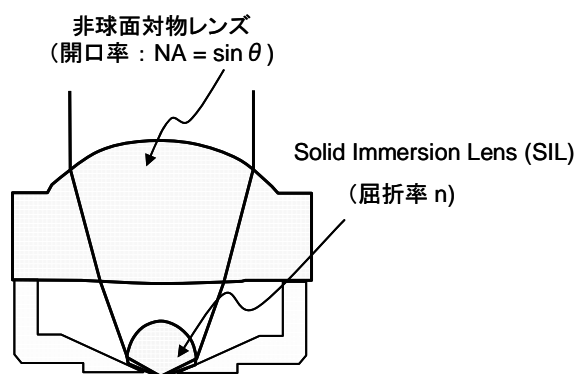


図2.3.1 SIL型近接場光システムの光ピックアップ

対物レンズから出射された $NA = \sin \theta$ の光は、入射角 θ の角度で SIL に入射されることになる。半球型、超半球型 SIL に入射された光の様子を図 2.3.2 に示す。

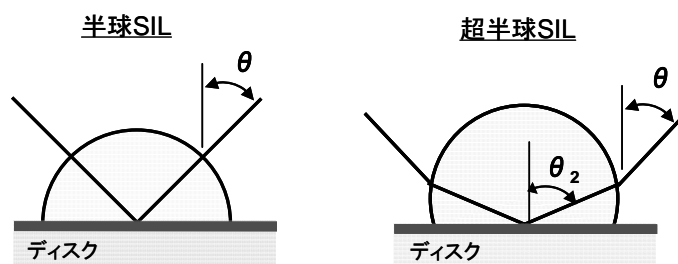


図2.3.2 半球型SILと超半球型SIL

それぞれの SIL 端面での光の開口率は以下になる[4] [5]。

半球型 SIL の場合

$$NA_1 = n \cdot NA = n \cdot \sin \theta > 1 \quad \dots\dots\dots (2.3.1)$$

超半球型 SIL の場合

$$NA_2 = n^2 \cdot NA = n^2 \cdot \sin \theta > 1 \quad \dots\dots\dots (2.3.2)$$

これは、次のように説明できる。光スポットサイズは、対物レンズの NA の逆数とレーザー波長

λ に比例する[3]。このため、ファーフールド光学系、つまり図 2.3.1 において非球面レンズだけで対物レンズが構成される場合、 $NA=\sin \theta$ の光がディスク上に入射されることになるため、スポットサイズ d は以下ようになる。

$$d \approx \frac{\lambda}{NA} = \frac{\lambda}{\sin \theta} \quad \dots\dots\dots (2.3.3)$$

これに対して、半球型 SIL の場合は、SIL 端面から出射される近接場光の波長 λ_1 は、屈折率 n の SIL 内部を通過するので、波長 $\lambda_1 = \lambda/n$ となる。また、ディスクへの入射角は SIL に入射した光の角度 θ のままである。従って、半球型 SIL の場合のスポットサイズ d_1 は以下ようになる。

$$d_1 \approx \frac{\lambda_1}{\sin \theta_1} = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \theta} \quad \dots\dots\dots (2.3.4)$$

一方、超半球型 SIL の場合は、SIL 端面から出射される近接場光の波長 λ_2 は、半球型 SIL と同様に波長 $\lambda_2 = \lambda/n$ となる。また、ディスクへの入射角は SIL に入射した光の角度 θ に対して、SIL 端面から出射するときは、 $\sin \theta_2 = n \cdot \sin \theta$ となる。従って、半球型 SIL の場合のスポットサイズ d_2 は以下ようになる。

$$d_2 \approx \frac{\lambda_2}{n \cdot \sin \theta_2} = \frac{\lambda}{n^2 \cdot \sin \theta} \quad \dots\dots\dots (2.3.5)$$

式(2.3.1)～(2.3.5)を比較することにより、半球型 SIL または超半球型 SIL の場合の実効的な NA_1 、 NA_2 は、結局、式(2.3.4)、式(2.3.5)のようになり、SIL 型近接場光により回折限界を超えた開口率 NA を実現することが可能となる。本論文では、より高い開口率が実現可能な超半球型 SIL を用いている。

2.4 SIL 型近接場光ディスクシステム

本研究テーマである SIL 型近接場光ディスクシステムにおけるナノギャップ技術の研究に用いたシステムのブロック図を図 2.4.1 に示す。

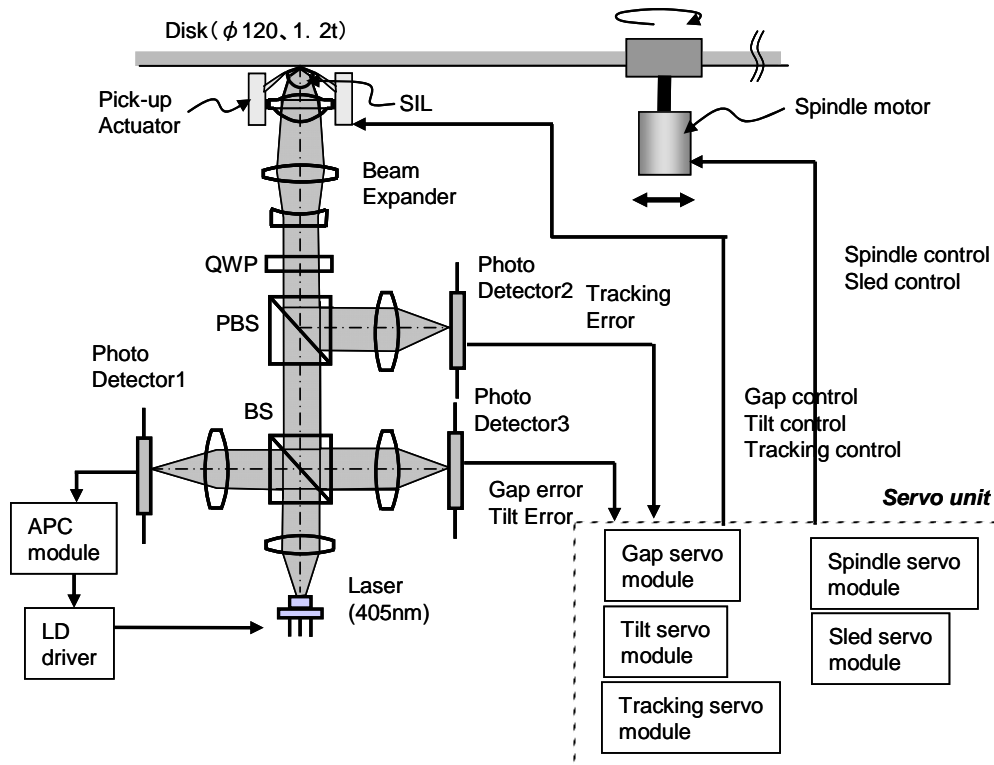


図 2.4.1 近接場光ディスクシステムブロック図

本研究における近接場光ディスクシステムでは、波長 405nm の青紫色レーザーを用いる。光ピックアップ部は、非球面レンズと SIL の 2 群レンズ構造となっており、ボイスコイルモーター(Voice Coil Motor; VCM) タイプのアクチュエーターに組み込まれている。本研究で用いた光ピックアップ部の様子を、図 2.4.2 に示す。

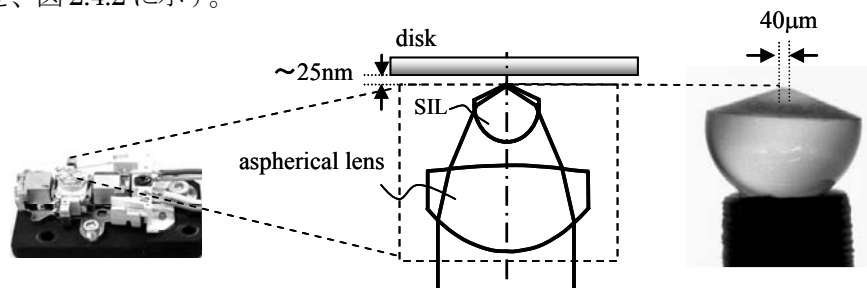


図2.4.2 近接場光ディスク装置の光ピックアップ部

SIL に要求される条件として、材料面から 1) 透過率 2) 高屈折率 3) 均質性 4) 等方性 5) 硬度、耐環境性 が挙げられる。本システムでは、これらの観点及び、入手容易性を考慮して、SIL としてガラス材料(LAH79)のものを採用している。本材料は、記録再生レーザー波長 405nm において屈折率 $n=2.075$ である。また、非球面レンズは同じくガラス材料のもので、 $NA=0.427$ であるものを用いている。一方、ディスク面に対向する SIL の形状面の観点からは、

6) 球面精度 7) 厚み精度 8) 先端形状 が重要となる。SIL の厚み誤差としては、球面収差の観点から厚み誤差が $1 \mu m$ 以下であることを要求される。本研究では、球面精度と厚み誤差が共に光学的に問題ないレベルであるものを用いている[6]。

SIL の直径は 0.9mm の超半球型であり、第 6 章に述べる SIL 先端部のエアフローの観点から、SIL 先端が $40 \mu m$ 、テーパ角度が 70 度であるコンカル形状となっている[7]。

SIL の屈折率が $n=2.075$ 、非球面レンズの開口率が $NA=0.427$ であることから、式(2.3.2)より、本システムにおける実効的な開口率 NA' は、以下のように 1.84 となる。

$$NA' = n^2 \cdot NA = (2.075)^2 \cdot 0.427 = 1.84(>1) \quad \dots\dots\dots (2.4.1)$$

アクチュエーターは、従来の光ディスクと同様な VCM 駆動で、ディスク面に対して垂直軸のギャップ方向、水平方向のトラッキング方向の 2 軸アクチュエーター、または、上記 2 軸に加えて、ディスク半径方向の傾きであるラジアルチルト軸を加えた 3 軸アクチュエーターを用いる。チルトアクチュエーターについては、第 4 章で述べる。レンズアクチュエーター性能についてナノギャップ性能への影響については第 5 章で述べる。

ディスクは、基本的に従来の光ディスクと同様に直径 120mm のポリカーボネイト基板を用いて実験するが、ギャップサーボ性能の改善の観点から別の基板構造のディスクも実験した。ディスク基板のナノギャップ性能への影響については、第 5 章に述べる。

波長 405nm の半導体レーザー素子から出射した直線偏光のレーザーはビームスプリッター (Beam Splitter, BS) により、レーザー制御用ビームと記録再生用ビームとに分岐される。レーザー制御用ビームは、オートパワーコントローラー (Auto Power Controller ; APC) にフィードバックされ、APC にて設定されたパワーとなるようにレーザードライバにて発光される。記録パワーは 5mW 程度、再生パワーとしては 0.2mW 程度である。記録再生用ビームは、行路においては偏光ビームスプリッター (Polarized Beam Splitter, PBS) を通過し、1/4 波長板 (Quadratic Wave Plate, QWP) にて直線偏光から円偏光に変換される。この円偏光に変換する理由は、ギャップエラーと RF 信号を光学的に分離するためで、第 3 章で詳しく述べる。円偏光に変化されたビームはエキスパンダにてフォーカス調整されディスク面上の記録再生面にフォーカスされる。本システム

では、第3章で述べるギャップサーボにより SIL 端面とディスク間のギャップは一定に保持される。このため、エキスパンダを調整することフォーカス点を調整すること可能となる。ディスクからの戻り光は、QWP を通り再び直線偏光に戻された後、入射ビームと垂直な偏光面を持つ成分が PBS で反射し、フォトディテクタ (Photo Detector; PD) 2 で、RF 信号またはトラッキングエラー信号として検出される。本システムでは、トラッキングエラーは従来の光ディスクと同様にプッシュプル信号[8]として検出される。トラッキングエラー信号によりトラッキングサーボ部にてピット部もしくはグルーブに光スポットが追従するように制御される。これは、従来の光ディスクと全く同様である。このため、本研究においては特にトラッキングサーボについては言及しない。

一方、入射ビームと平行な偏光面を持つ成分は PBS を通過し、BS で反射し PD3 で、ギャップエラー信号として検出される。または、第4章で述べるように4分割ディテクタで受光することでチルトエラー信号が生成される。ギャップエラー信号、チルトエラー信号はそれぞれ、ギャップサーボ部、及びチルトサーボ部に送られ、SIL とディスク間のギャップが衝突することなく一定のギャップ長に保持される。本システムでは、ギャップ長を 25nm 程度としている。ギャップサーボとチルトサーボについては、それぞれ、第3章、第4章で詳しく述べる。この他、所望の回転数になるようにスピンドルモーターを制御するスピンドルサーボ、サーボトラックピッチに応じて光ピックアップ部を送り、また、所望のトラックに光ピックアップ部を移動させるスレッドサーボが行われる。

図 2.4.3 に、ナノギャップ技術検討に用いた近接場光ディスクシステムを示す



図2.4.3 近接場光ディスクシステム

図 2.4.3 に示す近接場光ディスクシステムは、通常のオフィス環境下に設置されており、クリーンルーム内には設置されていない。また、クリーンベンチなどにも設置されていない。従来の光ディスクシステムの動作環境と全く同様である。このような環境下であっても、ハードディスクと同様なナノギャップ動作をしながら、従来の光ディスクと同様にポリカーボネイト基板を用いて、数十 nm でのギャップの維持を実現しており、高密度な光ディスクの記録再生に成功している。

2.5 まとめ

本章では、SIL とディスク間のギャップを記録再生レーザー波長の $1/4$ 以下に近接させることで生じる近接場現象について述べた。そして、SIL を用いた近接場結合により得られる近接場光を用いることで、従来の回折限界である 1 を超える開口率を実現できることを示した。また、本研究対象である SIL を用いた近接場光ディスクシステムについて述べた。当該近接場光ディスクシステムは、実効開口率が 1.84 である SIL を備え、また記録再生波長が 405nm であり、通常のオフィス

環境下で設置されている。この環境下において、従来の光ディスクと同様にポリカーボネイド基板を用いて、**SIL** とディスク間のギャップを **25nm** 程度に保持し、安定な近接場光を発生させることに成功している。

参考文献

- [1] 左貝潤一、“光学の基礎”、コロナ社 (1997)、pp. 8-9
- [2] 大津元一、河田 聡、“近接場ナノフォトニクス入門”、オプトロニクス社、pp. 7-9 (2000)
- [3] 尾上守夫監修、“光ディスク技術”、ラジオ技術社、pp. 27-28 (1988)
- [4] S.M. Mansfield and G.S. Kino, “Solid immersion microscope”, Appl. Phys. Lett., **57**, No.24, pp.2615-2616 (1990)
- [5] B.D.Terris, H.J.Mamin, D.Rugar, W.R.Studenmund, and G.S.Kino, “Near-field optical data storage using a solid immersion lens”, Appl.Phys. Lett., **65**, N0.4, pp.388-390 (1994)
- [6] M.Shinoda, K.Saito, T.Kondo, T. Ishimoto, and A. Nakaoki, “High-Density Near-Field Readout over 50GB Capacity Using Solid Immersion Lens with High Refractive Index”, Jpn. J. Appl. Phys., **42**, No. 2B, pp.1101-1104 (2003)
- [7] T. Ishimoto, T. Ito, M. Shinoda, K. Saito, T. Kondo, T. Matsui, S. Kim, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Head Analysis in an Air Flow on a Near Field Optical Disk System with a 2-Axial Actuator", Jpn. J. Appl. Phys. **44**, No.5B, pp. 3410-3411 (2005)
- [8] 浮田宏生、“オプトメカトロニクス”、森北出版社 (2001)、pp.104-105

第3章 ナノギャップサーボ技術

3.1 はじめに

近接場光ディスクシステムでは、回折限界を超えた光学解像度を得るために近接場光を用いて信号の記録再生を行う。近接場光を発生させるためには、固体浸レンズ (Solid Immersion Lens: SIL) と光ディスクとのギャップを近接場光が発生する距離に一定に保持する必要がある。ギャップが、一般に記録再生レーザー波長 λ 以下、具体的には $1/4$ 以下で完全に近接場状態となる[1]。例えば、記録再生波長レーザーとして波長 405nm の青紫色レーザーを用いて、記録材料として DVD、Blu-ray で用いられている相変化膜を用いた場合、 100nm 以下で近接場状態となる[2]。後述の § 3.3 で述べているようにギャップが小さいほどディスク側に透過する光が多くなる。このため、記録再生信号振幅は大きくなり SNR は良くなるが、ギャップをゼロにすることは SIL がディスクに接触させることであり、SIL 及びディスク表面の摩耗も招くことから望ましくない。そこで、本研究ではギャップを 25nm 程度に設定している。この動作距離は、従来のファーフールド光学系の光ディスクシステムでは焦点深度以下である。例えば、記録再生レーザーを実用化されている半導体レーザーの最短波長である 400nm 程度とし、対物レンズの開口率をファーフールド系での理論最高値である 1 としても、焦点深度 z は以下ようになる[3]。

$$z = \pm \frac{\lambda}{2 \cdot \text{NA}^2} = \pm \frac{400(\text{nm})}{2 \cdot 1^2} = \pm 200(\text{nm}) \quad \dots\dots\dots (3.1.1)$$

式(3.1.1)により、ファーフールド光学系では、 $\pm 200\text{nm}$ 以下の焦点分解能を得ることはできない。つまり、近接場光ディスクシステムでは、従来の光ディスクシステムの焦点深度内でのギャップサーボ技術を要求し、またその精度もナノレベル精度を要求している。

一方で、光ディスクシステムには、市場からの要求としてディスクの可搬性が要求される。従ってディスクとドライブが分離されることになるため、ディスクがスピンドルモーターにクランプされる状態によりディスクの面ぶれ量は不定となる。また、光ディスクで一般的に用いられているポリカーボネイト基板の場合、ディスク基板自身の歪みのためにハードディスクで一般に用いられているガラス基板と異なり、一般にディスク面ぶれ量は数十 μm 以上はある。これら点が、ヘッドとディスク間が同じくナノギャップであるハードディスクと大きく異なる点である。また、SIL はディスクとの衝突を防ぐため、ディスクのドライブへのローディング前は、ディスクから数百 μm 以上離れたファーフールド状態の位置に設置されており、ディスクがドライブにローディング後に、数十 nm の近接場状態にディスク衝突することなく引き込むことが要求される。

以上のように、SIL 型近接場光ディスクシステムを実現するための前提となるナノギャップを実現し維持するシステムでは、第一に、ナノメートル精度で近接場状態の検出が可能なギャップエラー検出手法が必要となる。第二に、ファーフールド状態から近接場状態に SIL をディスクに衝突させることなく安定して引き込む技術が必要となる。第三に、近接場状態に SIL を引き込み後に、ディスク面ぶれに追従して所望のナノギャップに安定に維持するギャップサーボ技術が必要となる。

本章では、以上のギャップエラー検出手法、近接場状態への安定した引き込み手法、ギャップサーボ技術について述べる。

3.2 ギャップエラー検出手法

3.2.1 従来の検出手法

SIL 型近接場システムに限らず、近接場光を用いる光ディスクシステムでは、SIL とディスク間のギャップを数十 nm の近接場状態に維持する必要がある。ディスクは、スピンドルモーターへのクランプ時の歪み、ディスク自重による歪み等で回転時にディスク面ぶれが生じる。このため、ディスク面ぶれに追従して SIL とディスク間のギャップを一定に保持する必要がある。ギャップを一定に維持するために、ハードディスクと同様なフライングヘッドを用いた例[4][5]もあるが、第 2

章でも述べたように、光ディスクではディスク面ぶれがハードディスクと比較して大きく、また不定であるため、フライングヘッドによるエアフローによるパッシブ制御ではなく、ギャップエラーを検出し、そのエラーを用いたフィードバックサーボ系によるアクティブ制御を行う手法の方が、面ぶれに追従するダイナミックレンジの点で望ましいと考えられる。

ギャップエラー検出方式としては、静電容量手法が報告されている[6]。静電容量手法では、図 3.2.1.1 に図示されているように、SIL の端面の中央部に突起をつけた構造（ネーベル構造）の SIL 用い、当該突起以外の部分に電極を形成する。そして、SIL 端面の電極とディスク間との静電容量により発振回路を構成して検出し、所望の発振周波数になるようにギャップを調整する。

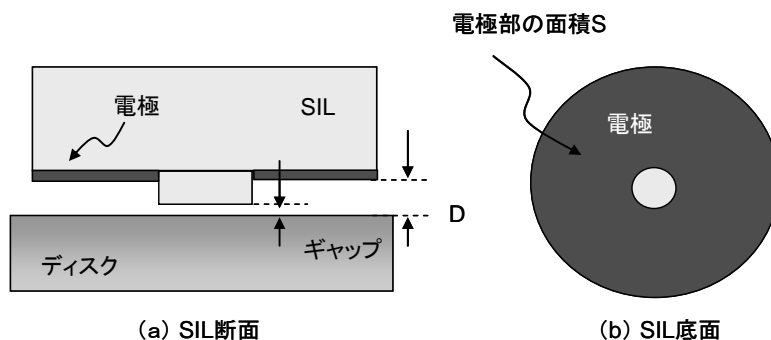


図3.2.1.1 静電方式ギャップエラー検出

本手法において、SIL 端面の電極部とディスク間の距離を D 、電極部の面積を S とすると、SIL とディスク間の静電容量 C は以下になる。

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{D} \quad \dots\dots\dots (3.1.1.1)$$

また、SIL とディスク間の浮遊静電容量を C_f とする。電極に電線をつけて外部にインダクタ L を接続し、共振発振回路を構成すると、発振周波数は以下になる。

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot (C + C_f)}} \quad \dots\dots\dots (3.1.1.2)$$

式(3.1.1.2)による発振周波数と外部の所望のギャップに対応する目標周波数の位相誤差によるフェーズドロックループ（Phased Lock Loop; PLL）サーボ系を構成することでギャップを制御する。

この方法の利点は、ギャップを静電容量として検出することからディスクから数十 μm 離れた距離からギャップエラーが線形的に検出でき、後述の光学検出手法と比較して、サーボ引き込み範囲が広い点である。

ところが、本手法では、以下のような問題点があった。つまり、SIL 端面に図 3.2.1.1 に示すように電極を設置し、外部に電線を引き出す必要がある。また、ディスクにも導電性を持たせる必要があり、ディスク材料に制約が生じる。さらに、制御をするのは電極間の距離 D であり、ギャップを計測して直接的に制御するわけでない。このため、SIL 突起部と電極部との位置関係（平行度）を高精度で保証する必要がある。この他、第 6 章でも述べるように、SIL 端面に突起部を設ける構造となるため、SIL 周辺部のエアフローの観点からダストに対して非ロバストであるという問題点もあった。

3.2.2 光学式ギャップエラー検出手法 [7][8]

SIL 型近接場光ディスクシステムにおけるギャップエラー検出手法として、前節の静電容量式の問題点を解決するために、本研究では光のみでギャップエラーを検出する光学検出手法を導入する。

本手法は、SIL 端面で全反射する光量を検出することでギャップ長を検出するものである。SIL 端面での全反射戻り光量の様子をシミュレーション結果を図 3.2.2.1 に示す。

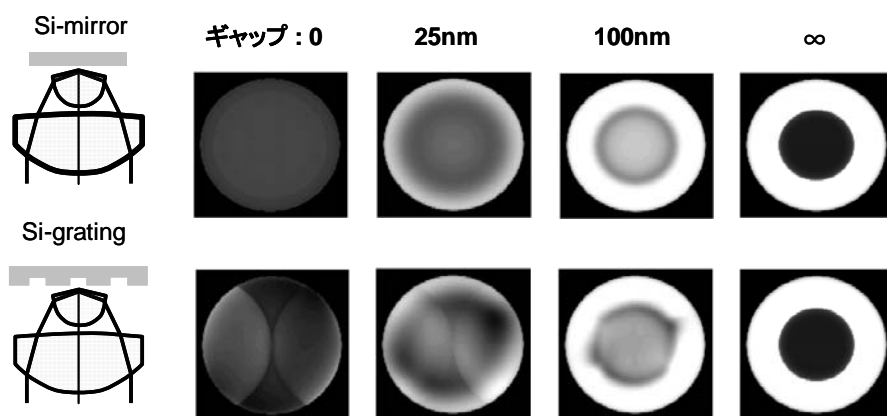


図3.2.2.1 全反射戻り光量特性(シミュレーション)
(λ : 405nm, NA : 1.84; Si Disk)

図 3.2.2.1 は、シリコン(Si)ディスク上に形成したミラー部及びピッチ 220nm、深さ 40nm のグレーティング部に、NA=1.84 である SIL を通して波長 405nm のレーザーを入射した場合の SIL とディスク間のギャップと全反射戻り光量の様子を示したものである。図 3.2.2.1 に示すように、SIL とディスクが十分に離れている場合は、ファーフールド状態となり SIL 端面で全反射する角度で入射した光 ($NA>1$ の光成分) は SIL 端面で全反射される。しかし、波長の 1/4 程度の 100nm 以下になると § 2.2 で述べたように、一部の全反射戻り光成分がディスクとの近接場結合により近接場光としてディスク側に透過するので、全反射戻り光量としては減少する。そして、SIL とディスクが完全に接触、つまりギャップがゼロになると、SIL 端面での全反射光成分が全て近接場光としてディスク側に透過するので、全反射戻り光量成分としてはゼロとなる。従って、ギャップ長と全反射戻り光量の関係は図 3.2.2.2 に示すようになる。

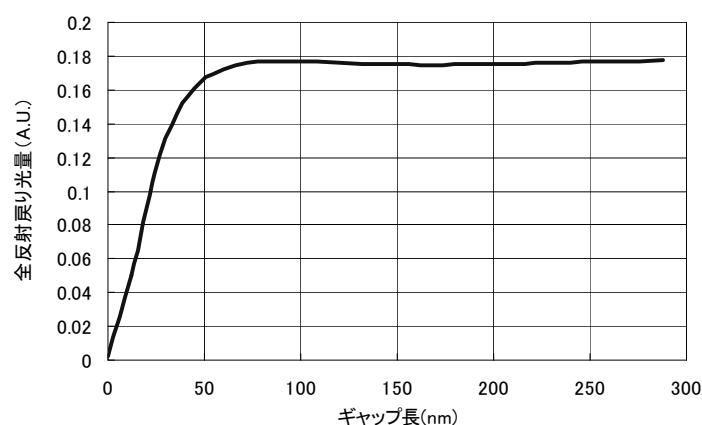


図3.2.2.2 全反射戻り光量特性(シミュレーション)
(λ : 405nm, NA : 1.84; Si disk)

以上は、ディスクとして Si ディスクを用いた場合であるが、記録材料として相変化を用いたディスクについても同様である。相変化ディスクの場合に、SIL をディスクに接近させた場合の全反射戻り光量電圧の実測値を図 3.2.2.3 に示す。

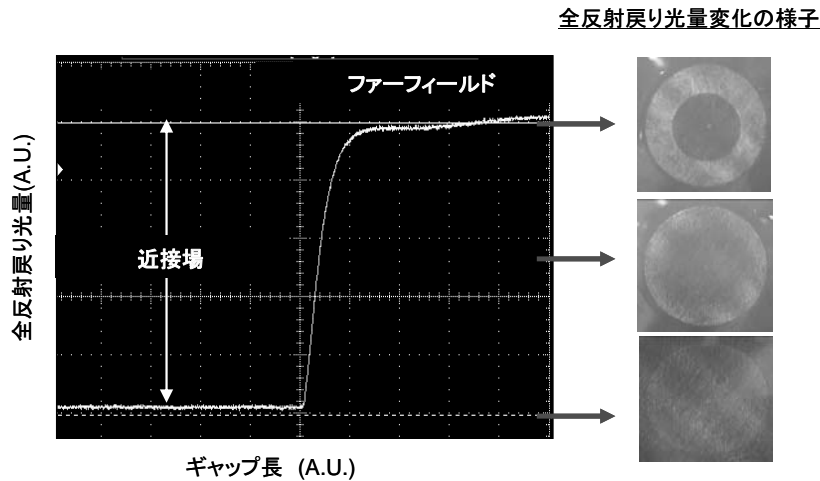


図3.2.2.3 全反射戻り光量特性(実測)
(λ : 405nm, NA: 1.84; Phase Change Media)

図 3.2.3.2 と図 3.2.2.3 を比較すると、ディスク材料は異なるものの近接場結合という物理現象においては同様であり、実測結果においてもシミュレーションとを同様な結果を示していることがわかる。シミュレーション結果、実測結果から、近接場領域では、ギャップ長と全反射戻り光量電圧がほぼ線形関係にあることから、近接場領域内の全反射戻り光量値を用いることでギャップサーボが可能であることがわかる。このように光学検出手法によれば、静電容量手法と異なり、SIL は従来の光ディスクシステムと同様にレンズ材料のみの構成でよく、電極などの追加部品は不要である。また、ディスクに対向する電極が不要であることから、第 6 章で述べるように SIL 形状を工夫することでダストに対してロバスト化することが可能となる。また、ギャップエラーを光学的に検出するため、ディスク材料にも制約がない。この他、SIL 端面の全反射戻り光量を用いることから、SIL とディスク間のギャップを直接的に制御することが可能であるという利点がある。

以上のことから、本研究においては光学検出手法によるギャップエラー検出手法を導入した。ただし、本手法では、図 3.2.2.2、図 3.2.2.3 に示すように、近接場結合が生じる近接場領域（数十 nm 以下）しかギャップエラーが検出できないという問題点がある。一方で、光ディスクはリムーバブル性を持たせるため、SIL とディスク間の初期のギャップは、数百 μm 程度離されている。このため、数百 μm の距離から数十 nm の近接場状態に SIL がディスクに衝突することなく引き込み、かつ、ディスク面ぶれに追従してナノギャップを維持し、近接場結合を保持する技術が要求される。む技術が重要となる。以下、これらの技術課題を解決するための光学ギャップエラーの検出光学系、ギャップサーボ技術、近接場引き込み手法について述べる。

3.2.3 光学式ギャップエラーの検出光学系 [7][8]

光学的にギャップエラーを検出するために、SIL 端面での全反射戻り光量を検出手法する。この全反射戻り光量を検出する手法として、直線偏光で検出する場合と、円偏光で検出する場合の 2 つの方法がある。本節では、これらの検出方法を比較検討する。図 3.2.3.1 にそれぞれの検出光学系を示す。

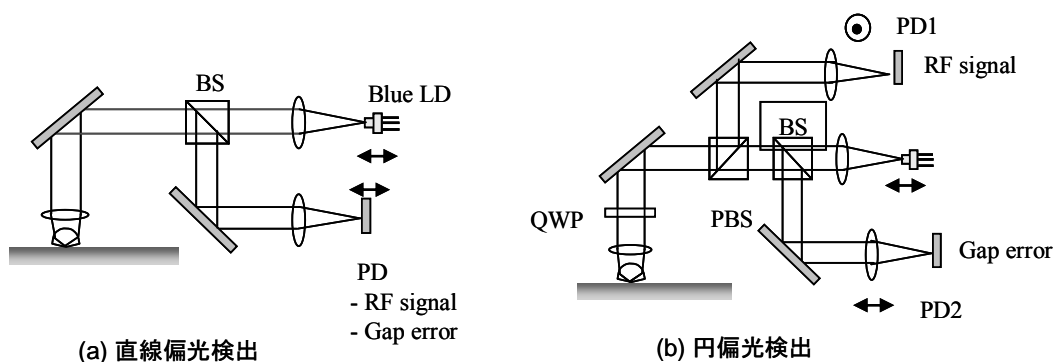


図3.2.3.1 光学式ギャップエラー検出手法

まず、直線偏光検出手法について述べる。この手法は、直線偏光の光をディスクに照射し、SIL端面の戻り光量を1つのフォトディテクタ (Photo Detector ; PD) で検出するものである。この場合、ディスクとしてディスク表面を保護するトップコート層のない再生専用 (Read Only Memory; ROM) 光ディスクの場合を例にとると、図 3.2.3.2 で示すようにディスク上のミラー部を通過する場合とピット部を通過する場合でギャップ長が異なる。

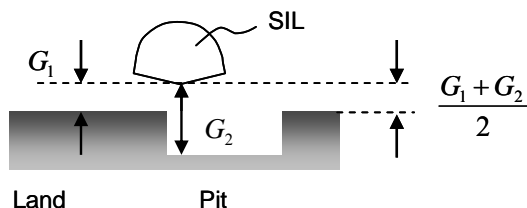


図3.2.3.2 直線偏光入射の場合のギャップエラー

つまり、ミラー部を通過する場合のギャップ長に相当する全反射戻り光量を G_1 、ピット部を通過する場合の戻り光量を G_2 とすると、ミラー部とピット部をランダムに通過することになるので、ギャップサーボにより SIL とディスク間が近接場状態のある一定値に保持される場合を考えると、SIL は G_1 と G_2 との平均距離 $(G_1 + G_2) / 2$ で一定に保持されることになる。一方、ディスクに記録されたピットからの再生 RF 信号は、上記の G_1 と G_2 そのものとして観察されることになる。従って、本手法の場合、受光した全反射戻り光量を数 MHz の RF 信号帯域で観察することで RF 信号が、数 kHz のサーボ帯域で観察すればギャップエラー信号が得られることになる。つまり、ギャップエラーは RF 信号を適当な帯域のローパスフィルターを通して観察することで得られる。

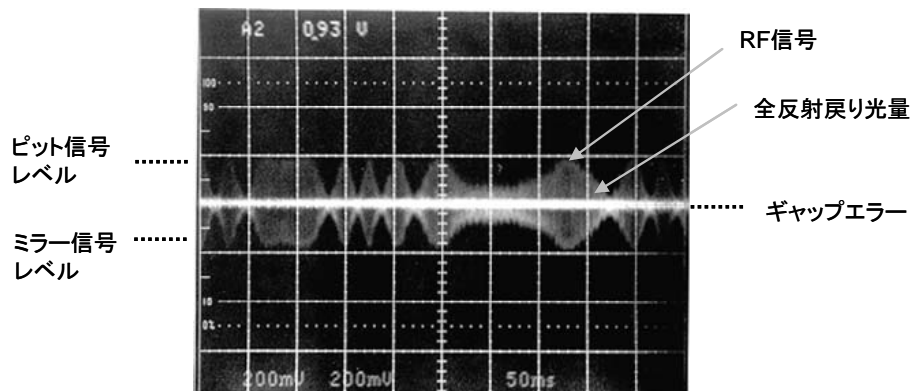


図3.2.3.3 直線偏光検出によるギャップエラーとRF (ギャップサーボ適用後)

図 3.2.3.3 は、本章で後述するギャップサーボ適用後の RF 信号（トラッキングサーボなし）とギャップエラーの様子を示したものである。図 3.2.3.3 に示すように、ギャップは、ピットレベルとランドレベルの平均値となっていることが明確にわかる。ROM ディスクの場合は、トラッキングサーボを適用した場合でも同様にピットレベルとミラーレベルとの平均値でギャップが維持される。グループ構造をもつ書き換え可能型（ReWritable:RW）ディスクの場合では、ROM ディスクと同様の原理でギャップが維持される。なお、第 6 章で述べるようにディスクの最表面にトップコートをつける場合においてもディスクの最表面はカバー層で埋められるが、この場合でもディスク表面がピットまたはグループの影響で必ずしも完全な平面ではない可能性があるが、同様な原理によりギャップサーボをかけることが可能である。

しかしながら、本手法では、ギャップエラー信号と RF 信号との分離をローパスフィルターで行うため、ギャップエラー信号に RF 信号の漏れ込みを完全に排除することができないという問題点がある。そこで、RF 信号とギャップエラー信号との信号分離を厳しくするためにローパスフィルター帯域を狭くしていくと、ギャップサーボ帯域がローパスフィルター帯域で制限されることになってしまう。そのため、ディスク面ぶれに対する SIL の追従性が悪化するだけでなく、ディスク回転数も制限され、転送レートの悪化を招いてしまうという問題点がある。

次に、円偏光検出手法について説明する。この手法では、レーザーから出射された直線偏光の光を $1/4$ 波長板を通して円偏光にしてからディスクに入射し、SIL 端面の戻り光量については、 $1/4$ 波長板を再度通して直線偏光に戻した後に、入射レーザー偏光面と同一平面成分をギャップエラー、垂直成分を RF 信号として検出するものである。円偏光入射は、従来の CD、DVD、Blu-ray などのファーフールド光学系の光ディスクと同様な入射手法である。但し、ファーフールド光学系の場合では、ディスクからの戻り光の偏光面は、入射レーザーの偏光面に対して垂直成分しかないため、図 3.2.3.1(b)において、PD1 でのみ RF 信号が検出され、PD2 には何も信号が検出されない[9]。ところが、近接場光学系では、フレネル菱面体の原理から、ディスク面に入射した全反射光がディスク面から再び出射される場合に位相面が回転するため、反射光が $1/4$ 波長板により直線偏光に変換されたときに入射レーザーの偏光面に対して垂直成分だけでなく、平行成分も生じる[10]。図 3.2.3.4 に、入射レーザー偏光面と垂直光量成分を受光した PD1 の電圧、同一平面光量成分を受光した PD2 の電圧とギャップ長との関係について、ランド部（ミラー部）とグループ部（ピット部）のガラス基板に対するシミュレーション結果を示す。

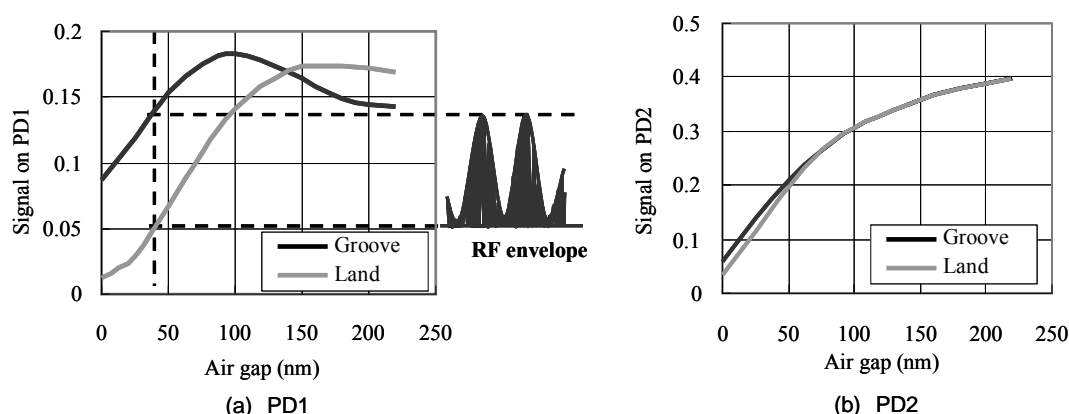


図3.2.3.4 ギャップ長とPD1もしくはPD2の関係(グループ部とランド部)

図 3.2.3.4 より、PD2 については、ギャップと検出電圧に対して、ランド部（ミラー部）とグループ部（ピット部）共にほぼ同様な関係を示している。このことは、ランド部（ミラー部）とグループ部（ピット部）問わず、光学的に安定したギャップエラー検出が可能であることを示している。一方の PD1 については、ギャップエラーである PD2 とは全く異なる挙動を示しており、ギャップを一定に保持したもとはランド部（ミラー部）とグループ部（ピット部）との差が RF 信号とし

て検出される。図 3.2.3.5 に、ROM ディスクに対して本手法によるギャップサーボ適用後の RF 信号とギャップエラーの様子を示す。

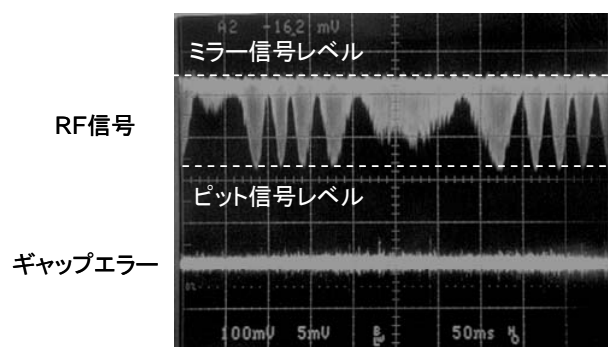


図3.2.3.5 円偏光検出によるギャップエラーとRF (ギャップサーボ適用後)

図 3.2.3.5 に示すように、本手法によれば、光学的に RF 信号とギャップエラー信号を分離することが可能である。つまり、直線偏光検出の場合と異なり、信号分離するためのローパスフィルタは不要であり、ギャップサーボシステムはギャップエラー検出系の帯域に制限されることなく設計することが可能である。また、円偏光であることから従来の光ディスクとはほぼ同様な光学系で近接場光学系を組むことが可能である。

以上のことから、本研究における近接場光ディスクシステムにおけるギャップエラー検出方法は、光学式ギャップエラー手法とし、かつ円偏光検出手法を採用している。

3.2.4 ギャップエラー評価方法[7]

ギャップサーボを行うときのギャップの設定、残渣ギャップエラー量の評価をするにあたり、ギャップをナノメートル精度で評価する必要がある。ナノギャップを評価するには、静電センサーや歪みゲージをヘッド部に設置して客観的に測定する手法も考えられるが、現実的には、センサー設置方法、設置誤差の補正などの問題があり、測定は困難だと考えられる。

本研究では、光学的にギャップエラー信号 (Gap Error Signal: GES) が得られていることから、GES を用いてギャップを評価することにした。GES によりギャップを評価するためには、GES と実際のギャップとの対応関係が重要となる。GES とギャップとの対応はシミュレーションにより導出が可能である。

図 3.2.4.1 に、一例として、ガラスディスクを用いた場合において、 $\lambda=405\text{nm}$ 、 $\text{NA}=1.84$ の場合の GES のシミュレーション値と実測値との比較を示す。

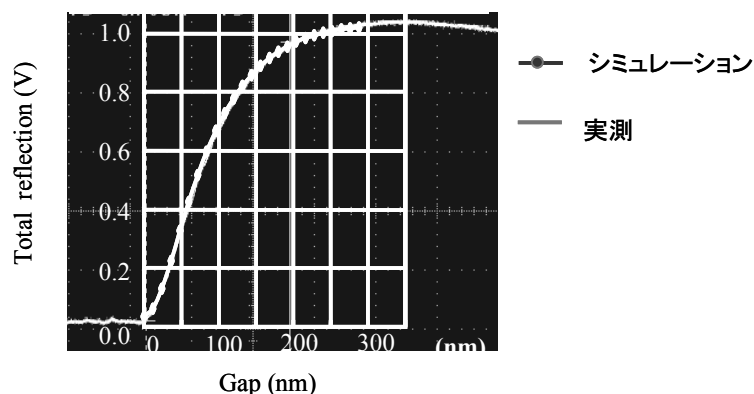


図3.2.4.1 ギャップエラーのシミュレーション値と実測値の比較

図 3.2.4.1 より、シミュレーション波形と実測波形は良く合致しており、互いに整合性が取れていることが確認できた。そこで、本研究でのギャップエラー評価として、シミュレーション値を参照することでギャップを評価することとした。

3.3 ギャップサーボシステム[11]

3.3.1 基本構成

本節では、ファーフールド状態から近接場状態に引き込んだ後にディスク面ぶれに追従し、SIL端面とディスク間のナノギャップをナノメートル精度で制御するギャップサーボシステムについて述べる。なお、近接場引き込み技術については、§ 3.4 にて述べる。

ギャップサーボシステムのブロック図を、図 3.3.3.1 に示す。

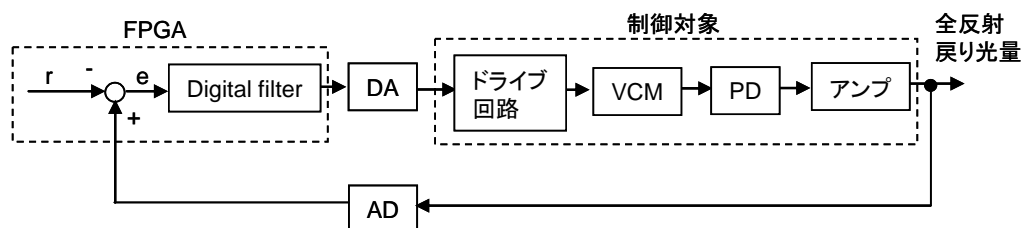


図3.3.3.1 ギャップサーボシステムの基本構成

図 3.3.3.1 において、§ 3.2.3 で述べた全反射戻り光量が AD 変換器にてデジタル化され、フレキシブル・プログラマブル・ロジック・アレイ（Flexible Programmable Logic Array; FPGA）に入力される。FPGA では、デジタル値である目標値 r と全反射戻り光量との差分ギャップサーボエラー e となり、デジタルサーボフィルタを通して出力される。サーボフィルタの設計については § 3.4.3 にて述べるが、ギャップサーボシステムが安定化するように設計されている。サーボフィルタ出力は DA 変換器にてアナログ信号に変換された後、ドライブ回路に入力される。ドライブ回路は、§ 3.4.2 で述べているようにシステムの位相を悪化させないように電流ドライブ方式のものを採用している。レンズアクチュエーターとしては、従来の光ディスクシステムと同様にボイスコイルモーター（Voice Coil Motor; VCM）型アクチュエーターを用いている。VCM は、対向配置した永久磁石とその間に電磁石を配置した構造からなる。ドライブ回路からの電流を電磁石に流し、その電流を変化させることで発生する磁界を変化させ、永久磁石で発生する永久磁界内でコイル変位を変化させる。電磁石に SIL を含む対物レンズを設置し、SIL とディスク間のギャップを変化させる。SIL 端面で全反射した光をフォトディテクタ（Photo Detector; PD）で受光し、適当なアンプを通して GES を得る構成となっている。

狭義に言えば、制御対象はレンズアクチュエーターである VCM であるが、ドライブ回路、PD、アンプも含めて制御対象として広義にとらえると、連続系表現でのギャップサーボシステムのブロック図は、図 3.3.3.2 のようになる。

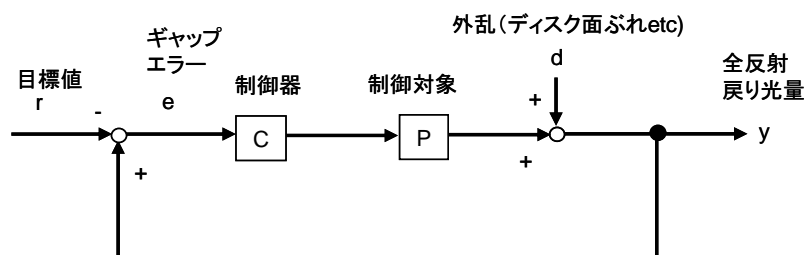


図3.3.3.2 ギャップサーボシステムのブロック図

図 3.3.3.2 において、 r は目標ギャップ、 C は制御器、 P は制御対象である。 y は観測エラー信号である全反射戻り光量である。 d はシステム外乱であり、ギャップサーボシステムでは、ディスク面ぶれ、外部振動、外部ショックなどである。本研究テーマであるナノギャップサーボ技術は、外乱 d に対して目標ギャップ値に一定に保持するギャップサーボ問題であると言える。

3.3.2 ギャップサーボ仕様[2]

まず、目標ギャップ値について検討する。

図 3.3.2.1 に、記録層が相変化膜である RW ディスクの場合の全反射戻り光量特性を示す。本例は第 7 章で述べる近接場記録再生システムに対するもので、GES については波長 780nm、RF 信号については波長 405nm でのシミュレーション例である。なお、以下、ギャップエラーは目標ギャップ値と全反射戻り光量との差分であるが、目標ギャップ値は一定値であることから、以下、全反射戻り光量をギャップエラー信号 (Gap Error Signal; GES) と等価な意味で用いる。

ファーフールド状態で全反射戻り光量が一定となるときの戻り光量を 1.0(V) に規格にした場合、図 3.3.2.1 に示すように 0.95 (V) 程度で全反射戻り光量が下がり始め、近接場状態になることがわかる。このときのギャップ長は 300nm である。ギャップサーボの目標値については、RF 信号の SNR の観点から、RF 振幅が大きく観察できるギャップが望ましい。ギャップがゼロのときに最大となるが、ゼロであることは SIL 端面がディスク表面に接触していることに相当するため望ましくない。そこで、本研究では、RF 信号の SNR の観点に加えて、メディア、及び SIL の耐久の観点から 25nm 程度としている。例えば、ギャップを 20nm とした場合の目標電圧値は 0.20V である。

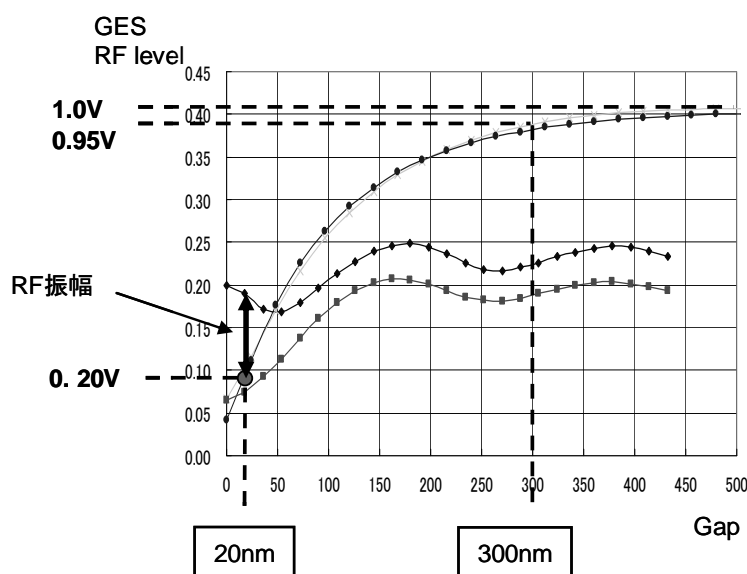


図3.3.2.1 ギャップとRFレベルまたはギャップエラーの関係(RWディスク)

また、ROM ディスクの場合 (シミュレーション) を図 3.3.2.2 に示す。

ROM ディスクの場合は、再生用システム用に GES、RF 信号とも波長 405nm でのシミュレーション例である。RW ディスクでのシミュレーション例と同様に、ファーフールド状態で全反射戻り光量が一定となるときの戻り光量を 1.0(V) に規格にした場合、図 3.3.2.2 に示すように 0.95 (V) で全反射戻り光量が下がり始めて、近接場状態になることがわかる。このときのギャップ長は 200nm である。ROM ディスクの場合もギャップが狭いほど RF 振幅が取れるが、RW ディスクと同様に 20nm ~25nm とした。

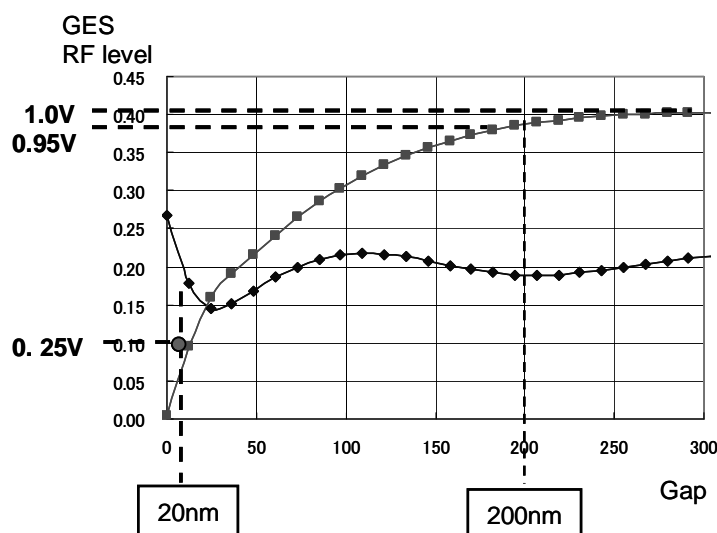


図3.3.2.2 ギャップとRFレベルまたはギャップエラーの関係 (ROMディスク)

次に、必要とされるディスク回転数について検討する。

第1章で述べた光ディスクの開発動向において、デジタルシネマ映像、スーパーハイビジョン映像等の記録再生の市場からの需要を考慮すると、100Gbyte 以上の記憶容量、100Mbps 以上の転送レートが求められる。まず、Blu-ray システム仕様を基本として、近接場光ディスクシステムに要求されるディスク回転数を考える。Blu-ray システムでは、単層あたりの容量、転送レートは、25Gbyte、36Mbps である。また、ディスク回転方式は、線速度一定 (Constant Linear Velocity; CLV) 方式を採用しており、最内周 24mm において 1957rpm である。ディスク容量については、100Gbyte / 25Gbyte = 4 倍以上が要求される。近接場による光スポットの微小化により、線方向とトラッキング方向がそれぞれ同比率で微小化されることから、線方向の記録密度向上分は半分の 2 倍程度となる。従って、Blu-ray と同じ符号化を用いた場合、転送レートは線方向の密度向上分だけで、36Mbps × 2 = 72Mbps となる。従って、100Mbps を達成するディスク回転数としては、以下のようになる。

$$1957\text{rpm} \times \frac{100\text{Mbps}}{72\text{Mbps}} \approx 2,720\text{rpm} < 3,000\text{rpm} \quad \dots\dots\dots (3.3.2.1)$$

式(3.3.2.1)より、2,720rpm 以上であれば 100Mbps 以上が達成可能である。このため、本研究におけるディスク回転数目標を 3,000rpm とした。

次に、許容残渣ギャップエラーについて検討する。

図 3.3.2.1 を見てもわかるように、ギャップ長の変動と RF 信号振幅の変動は密接な関係がある。ギャップサーボをかけたときの、GES と RF 信号振幅の変動の様子を図 3.3.2.3 に示す。図 3.3.2.3 に示すように、GES 変動に比例して RF 信号振幅変動が比例していることがわかる。

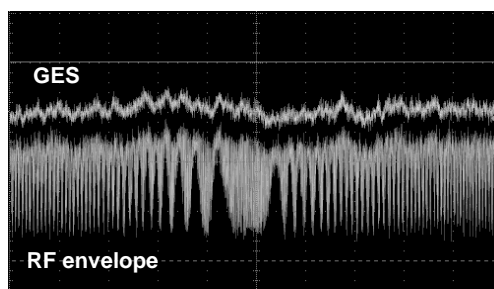


図3.3.2.3 GES変動とRFエンベロープ変動 (ノトラッキング)

このような RF 信号振幅があると、トラッキングをかけても再生クロック信号と再生信号との時間ずれであるジッターが悪化し、RF の信号品質が悪化する恐れがある。この RF 信号振幅変動は、GES 変動により、光による変調伝達関数 (Modulation Transfer Function; MTF) [13] が変動することに起因している。図 3.3.2.4 に、トラックピッチ 160nm の相変化膜ディスクに対する対物レンズの開口率 NA=1.83、波長 405nm の光学系の MTF シミュレーション結果を示す。

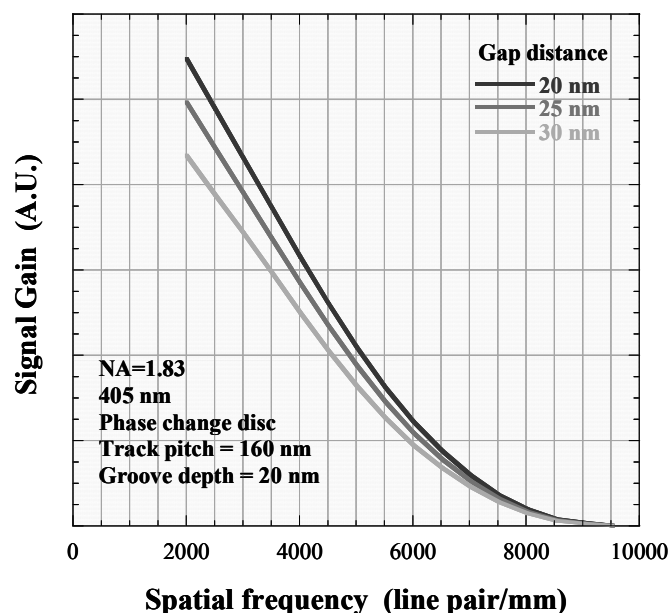


図3.3.2.4 ギャップ長のMTFへの影響

MTF 限界 x_0 は NA と λ で決まり、次式のようにギャップ長変動に依存しない[12]が、図 3.3.2.4 よりギャップ長が変動すると MTF が変動する、つまり光学解像度が変化することになる。

$$x = \frac{2 \cdot NA}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (3.3.2.2)$$

これは、RF 信号の変調帯域内において、実効的な NA が変動することに相当する。MTF が変動すると、図 3.3.2.3 に示すように、再生時に RF 信号振幅が変動し、RF 信号の SNR の悪化をもたらす。一方、信号記録時においても、ギャップが変動するとレーザーパワー効率変動する。シミュレーションの結果、ギャップ変動に対する再生時の RF 信号振幅変動率は、約 2%/nm であり、書き込み時のピークレーザーパワーの変動率は約 1.2%/nm と見積もられた[13]。

以上のことから、理想的にはギャップ変動が全くないことが望ましいが、これは、ギャップサーボの全帯域に渡りゲインが ∞ であることを要求することであり、実現不可能である。しかしながら、ギャップ変動により、RF 信号エンベロープ変動が生じて PRML (Partial Response Most Likelihood) などの信号処理を行うことにより、ある程度の変動があっても十分に低いジッター、エラーレートが得られることが実験でわかっている。そこで、本論文では 5nmPP のギャップエラー変動を許容することとし、記録パワー変動で 6%、RF エンベロープは 10% の変動を許容した。

次に、許容ディスク面ぶれについて検討する。

従来の研究報告によれば、ナノギャップ精度を要求することから、ディスク面ぶれ自体を抑制するために、ガラス基板、シリコン基板を用いていた[14][15]。これは、近接場光ディスクシステムにおける外乱を排除するためであると考えられる。しかし、実用的な使用を考えると、従来の光ディスクの基板と同様にポリカーボネード基板が望ましい。そこで、本論文では、基本的にポリカーボネード基板を用いることとした。

許容ディスク面ぶれ量は、例えば Blu-ray では $\pm 100 \mu\text{m}$ となっている。また、記録半径 r は

r=24mm～58mm であり、レバー比で最内周のディスク面ぶれ量は $\pm 41\mu\text{m}$ である。一方、許容誤差を考慮すると、Blu-ray では、 $\pm 45\text{nm}$ (90nmPP) であるのに対して、本システムの場合は5nmPP である。従って、サーボシステムを Blu-ray システムのもので固定して考えると、5nmPP の許容量を達成するには、比例計算により最内周で $\pm 2.3\mu\text{m}$ しか許容できないこととなる。ポリカーボネード基板を用いた場合、この条件はかなり厳しい。そこで、本研究では、実験的に、ディスクの製造マージンの観点から最内周でのディスク面ぶれを約 10 倍に緩和して、少なくとも $\pm 20\mu\text{m}$ (40 μmPP) を許容するようにした。

以上をまとめると、ギャップサーボ仕様は、以下ようになる。次節で、表 3.3.2.1 に基づいてリファレンスサーボを規定し、ギャップサーボシステムを設計する。

表3.3.2.1 ギャップサーボ仕様値

項目	目標値
ディスク回転数	> 3,000 rpm
ディスク面ぶれ	> 40 μm
ギャップ	～25nm
許容ギャップエラー	< 5 nm

3.3.3 リファレンスサーボ

光ディスクシステムでは、可搬性能が要求されるため、ドライブが異なっても安定してサーボがかかる必要がある。そこで、一般的に光ディスクでは、サーボ仕様を満足するリファレンスサーボを規定し、サーボシステムは当該リファレンスサーボを満足するように設計する。

リファレンスサーボの伝達関数 $H(s)$ は、以下のように規定される。ここで、 s はラプラス変換演算子を示す。

$$H(s) = \frac{1}{3} \left(\frac{\omega_0}{s} \right)^2 \cdot \frac{1 + \frac{3 \cdot s}{\omega_0}}{1 + \frac{s}{3 \cdot \omega_0}} \dots\dots\dots (3.3.3.1)$$

例として、 $\omega_0=100(\text{rad/s})$ の場合の周波数特性を図 3.3.3.1 に示す。

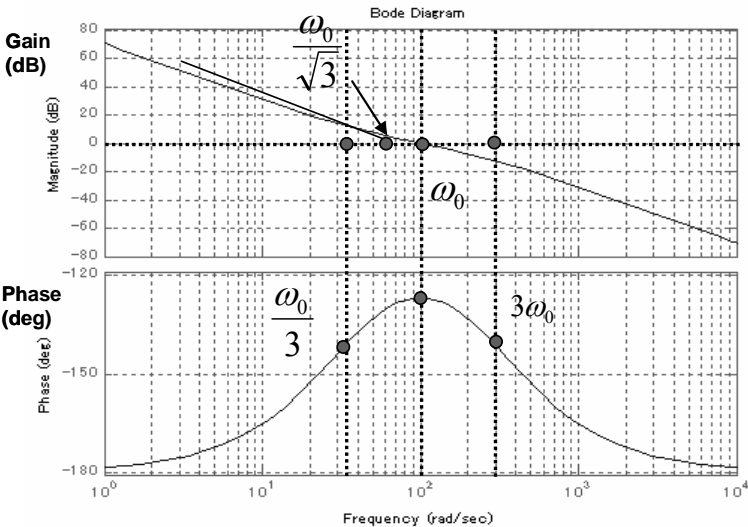


図3.3.3.1 リファレンスサーボの周波数特性例 ($\omega_0=100(\text{rad/s})$)

図 3.3.3.1 に示すように、式 (3.3.3.1) において、 ω_0 はカットオフ周波数を与える。リード、ラグフィルターのカットオフ周波数を $\omega_0/3$ 、 $3\omega_0$ とすると、 $\omega_0/3 \sim 3\omega_0$ 周波数において -20dB/dec となり、それ以外では 40dB/dec となっている。また、 $\omega < \omega_0/3$ における -40dB/dec ラインと 0dB との交点周波数は、 $\omega_0/\sqrt{3}$ となる。なお、 $H(s)$ はサーボループの低域感度関数の逆数から 1 をマイナスした関数と等価である。この $H(s)$ が、サーボシステムが満たすべきカットオフ近傍での周波数特性である。

DC ゲイン G_{dc} については、許容ディスク面ぶれ量を D 、許容取れ残り残渣を ε とすると、次式で規定される。

$$G_{dc} = 20 \log \frac{D}{\varepsilon} (dB) \quad \dots\dots\dots (3.3.3.2)$$

結局、DC ゲインについては、式 (3.3.3.2) と $H(s)$ で決まるカットオフ近傍の周波数特性が、サーボシステムが満足すべき周波数特性となる。

このもとで、§ 3.3.2 で規定したサーボ仕様に基づきギャップサーボシステムのリファレンスサーボを規定する。

まず、許容ディスク面ぶれ量 D が $40 \mu mPP$ 、許容取れ残り残渣エラー ε を $5nmPP$ であることから、DC ゲインは、以下ようになる。

$$G_{dc} = 20 \log \frac{D}{\varepsilon} = 20 \log \frac{40 \mu m}{5 nm} \approx 78 (dB) \quad \dots\dots\dots (3.3.3.3)$$

また、ディスク面ぶれ外乱は、回転 1 次成分が支配的であると考えて、次式の単振動にてモデル化される。

$$x = D_0 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (3.3.3.4)$$

但し、 $D_0 = D/2$ とした。

式(3.3.3.4)より、ディスク面ぶれ垂直加速度 a は、次式のようにになる。

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = -D_0 \omega^2 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (3.3.3.5)$$

式(3.3.3.5)において、振幅に着目すると最大ディスク面ぶれ振幅 D_0 の周波数特性は、以下のようにになる。

$$D_0 = \frac{a}{\omega^2} \quad \dots\dots\dots (3.3.3.6)$$

従って、サーボループの周波数特性 $G(\omega)$ は、次式のようにになる。

$$G(\omega) = 20 \log \frac{D_0}{\varepsilon_0} = 20 \log \frac{a}{\varepsilon} - 40 \log \omega \quad \dots\dots\dots (3.3.3.7)$$

または、

$$G(f) = 20 \log \frac{a}{\varepsilon} - 40 \log 2\pi - 40 \log f \quad \dots\dots\dots (3.3.3.8)$$

但し、 $\varepsilon_0 = \varepsilon / 2$ である。

以上より、ギャップサーボシステムの場合は、まず、式(3.3.3.6)より、

$$a = D_0 \omega^2 = \frac{40 \mu m}{2} \cdot (2\pi \cdot 50)^2 = 1.97 (m/s^2) \quad \dots\dots\dots (3.3.3.9)$$

となる。従って、式 (3.3.3.8) より、

$$G(f) = 20 \log \frac{1.97 m/s^2}{5 nm/2} - 40 \log 2\pi - 40 \log \omega = 146 - 40 \log f \quad \dots\dots\dots (3.3.3.10)$$

となる。よって、カットオフ周波数は、式(3.3.3.10)において $G(f)=0$ とおいて、

$$f_c = 4.5\text{kHz} \quad \dots\dots\dots (3.3.3.11)$$

これは、-40dB/dec での周波数特性ラインでのカットオフであり、図 3.3.3.1 における-20dB/dec でのカットオフ周波数の $1/\sqrt{3}$ に相当する。従って、-20dB/dec でゼロクロスする周波数 f_c' は、式 (3.3.11) 式の $\sqrt{3}$ 倍となる。結局、必要なカットオフ周波数 f_c' は、以下ようになる。

$$f_c' = 4.5\text{kHz} \times \sqrt{3} = 7.7\text{kHz} \quad \dots\dots\dots (3.3.3.12)$$

なお、Blu-ray の場合と同様に、サーボマージンファクタを 1.2 とすると、次式のようにになる。

$$f_c' = 4.5\text{kHz} \times \sqrt{3} \times 1.2 = 9.2\text{kHz} \quad \dots\dots\dots (3.3.3.13)$$

以上、式(3.3.3.3)、式(3.3.3.10)、式(3.3.3.12)より、近接場光ディスクシステムにおけるギャップサーボのリファレンスサーボの周波数特性は図 3.3.3.2 のようになる。

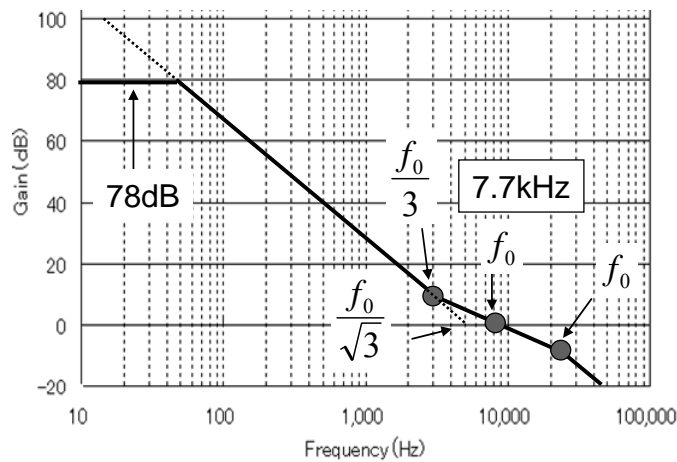


図3.3.3.2 ギャップサーボシステムの周波数特性

つまり、表 3.3.2.1 に示したギャップサーボ仕様を満足するには、図 3.3.3.2 に示すリファレンスサーボによる周波数特性を最低限、満足する必要がある。なお、従来の光ディスクで最も高精度を要求する Blu-ray の場合でも、リファレンスサーボのカットオフ周波数は 3.2kHz である。近接場光ディスクのギャップサーボでは、Blu-ray の 2.4 倍以上の帯域が要求されることになる。

3.4 メインループの高帯域化手法

3.4.1 レンズアクチュエーターのモデル化

図 3.3.3.2 で示されるギャップサーボループにおいて、本研究で用いた VCM アクチュエーターを図 3.4.1.1 に示す。

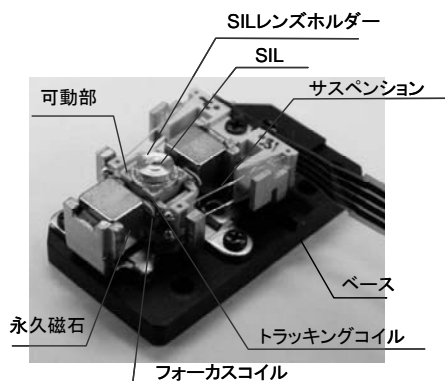


図3.4.1.1 VCMアクチュエーター

本研究で用いた VCM アクチュエーターは、基本的にはフォーカス方向とトラッキング方向に可動軸を持つ 2 軸アクチュエーターである（第 4 章で述べるチルトサーボを導入する場合は、3 軸アクチュエーターを用いる）。このアクチュエーターは、Blu-ray で用いられている 2 軸アクチュエーターをベースとして、対物レンズとして SIL と非球面レンズ（ともにガラス）を組み込んだものである。レンズが 2 群構成、かつガラスからなることから、可動部重量は、改造前の単玉のプラスチックレンズからなる Blu-ray レンズに比べて重くなり 400mg である。なお、レンズと可動部の重心を合わせるバランス材を可動部に組み込み、動作時にねじれ（ローリングモード）が生じないように調整してある。図 3.4.1.2 に、電圧駆動方式での 2 軸アクチュエーターの実測した周波数特性を示す。

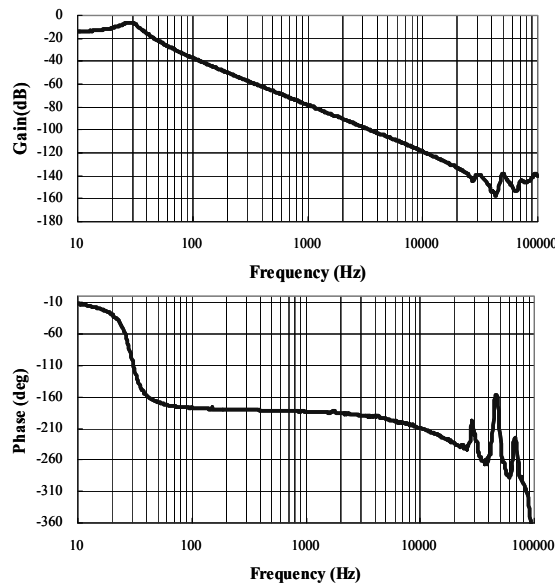


図3.4.1.2 2軸アクチュエーターの周波数特性(実測)

また、図 3.4.1.2 より、アクチュエーターのメカ特性値は表 3.4.1.1 のように得られた。

表3.4.1.1 VCMアクチュエーターのメカ特性

物理量	測定値
固有角周波数 ω_0	180(rad/s)
減衰係数 ζ	0.18
DC感度(10Hz)	2.01(mm/V)
AC感度(1kHz)	4.78(G/V)

図 3.4.1.2 より、VCM アクチュエーターはノミナルモデルとして 2 次系の伝達関数で表現できる。これは、§ 3.4.2 で述べる通りである。高域で位相が遅れているが、これ関係しても § 3.4.2 で述べるように測定回路が電圧駆動方式のためで、VCM の伝達特性に依拠したものではない。表 3.4.1.1 のメカ特性値を元にモデル化すると、式(3.4.4.1)のようになる。また、図 3.4.1.3 に実測の周波数特性を示す。図 3.4.1.2 と図 3.4.1.3 を比較すると、式(3.4.1.1)で得られたモデルは、アクチュエーターの実測値による特性と合致していることがわかる。

$$G_p(s) = \frac{5.6 \times 10^3}{s^2 + 6.5 \times 10^1 s + 3.3 \times 10^4} \dots\dots\dots (3.4.1.1)$$

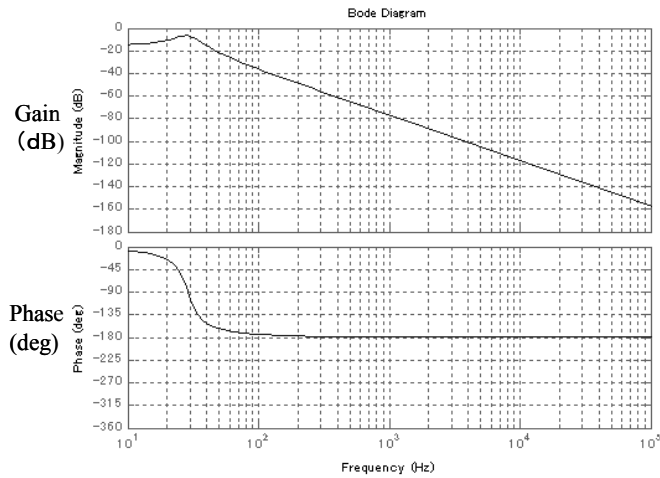


図3.4.1.3 VCMアクチュエーターの周波数特性(モデル)

3.4.2 ドライブ回路方式

VCM アクチュエーター方式として電圧駆動方式と、電流駆動方式の2種類ある。

まず、電圧駆動方式について考える。図 3.4.2.1 に VCM の電流駆動方式のモデルを示す。

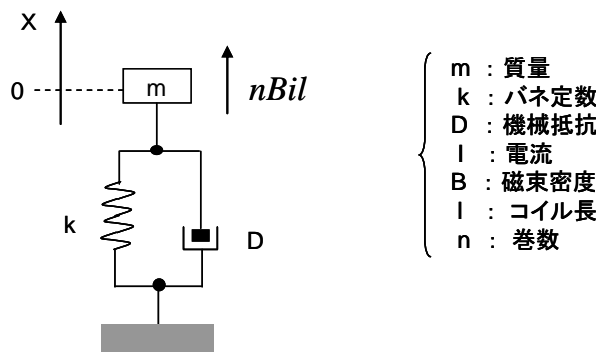


図3.4.2.1 VCMの電流駆動モデル

可動部がサスペンションで吊っており、可動部に設置されたコイルに流れる電流による生じる磁界が固定部に設定された永久磁石の磁界を横切ることによって推力を得る。図 3.4.2.1 において、質量 m の可動部についての運動方程式は、式(3.4.2.1)のようになる。

$$m\ddot{a} = nBI - kx - D\dot{x} \dots\dots\dots (3.4.2.1)$$

式(3.4.2.1)をラプラス変換し、電流駆動方式のときの VCM の伝達関数 $G_I(s)$ を求めると、次式のようになる。

$$G_I(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{nBl}{ms^2 + Ds + k} = \frac{\frac{\omega_0^2}{k} \cdot nBl}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \dots\dots\dots (3.4.2.2)$$

但し、 $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 、 $Q = \frac{\sqrt{mk}}{D}$ である。

式(3.4.2.2)のように、電流駆動式の場合は、VCM の伝達関数は、2 次系で表現される。

一方、図 3.4.2.2 に VCM アクチュエーターの電圧駆動方式のモデルを示す。

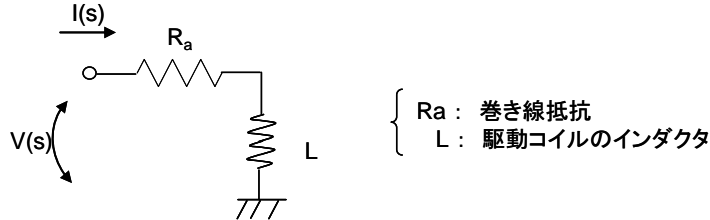


図3.4.2.2 VCMの電圧駆動モデル

図 3.4.2.2 において、駆動電流 $I(s)$ は、次式のようにになる。

$$I(s) = \frac{V(s)}{R_a + sL} \quad \dots\dots\dots (3.4.2.3)$$

従って、電圧駆動方式のときの VCM の伝達関数 $G_v(s)$ は、式(3.4.2.2)、式(3.4.2.3)より、次式のようにになる。

$$G_v(s) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{I(s)}{V(s)} \cdot \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{\frac{1}{R_a}}{1 + \frac{L}{R_a}s} \cdot \frac{\frac{\omega_0^2}{k} \cdot nBl}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad \dots\dots\dots (3.4.2.4)$$

式(3.4.2.4)より、電圧駆動方式の場合は電流駆動方式の場合と異なり、コイルのインダクタンスに依拠する 1 次ローパスフィルターの影響を受けるため、電圧駆動方式は、位相安定性を確保する上で不利である。そこで、本研究では、ギャップサーボにおける VCM アクチュエーター駆動方式として、電流駆動方式を用いている。電流駆動方式であれば、VCM アクチュエーターのモデルとしては、式(3.4.1.1)で示すように、インダクタンスの影響を考慮することない。

3.4.3 サーボフィルター設計

§ 3.3.3 に示したリファレンスサーボを満足するように、リード・ラグフィルターを設計する。サーボシステムのハードウェア仕様を表 3.4.3.1 に示す。

サーボ演算、システム制御は、約 50 万ゲートを有する Altera 社の EPF10K200SRC で構築している。本研究において、サーボシステム用 IC として Digital Signal Processing(DSP)ではなく FPGA を採用したのは、以下の理由による。

- ① サンプリング周波数の自由度が高く、AD、DA 性能に応じて設定できる。
- ② サーボシステム部とシステム制御部を一つの素子で効率よく実装できる。

①により、従来の DSP とは異なり、本システムでは、サンプリング周波数を AD 変換速度仕様にに基づき 300kHz~350kHz と、高速に設定することを可能にしている。また、②により、本システムでは、サーボシステム部とシステム制御部を一つの FPGA にて設計している。システムクロックは 36MHz である。AD 変換器は、変換クロック 18MHz の 12bit シリアル入力型を用いている。GES として全反射戻り光量を用いており、正直しか取りえないため、入力ダイナミックレンジを広く取るためにストレートバイナリ型で、AD 入力レンジを 0~+2.5V としている。このため、AD

ゲインは、 $2^{12}-1/2.5$ (count/V) となる。一方、DA 変換器は、変換クロック 9MHz の 16bit シリアル出力型を用いている。サーボ出力は、正負の値を取るため、オフセットバイナリ型で、DA レンジを $\pm 3.3V$ としている。このため、DA ゲインは、 $2^{15}-1/3.3$ (count/V) となる。

表3.4.3.1 サーボシステムのハードウェア仕様

項目	仕様
サーボロジックIC	Altera EPF10K200SRC
システムクロック	36MHz
サンプリング周波数	300KHz or 350kHz
AD変換器	<ul style="list-style-type: none"> - 12bit Straight binary - 0 ~ +2.5V出力 - serial input - Conversion rate : 18MHz
DA変換器	<ul style="list-style-type: none"> - 16bit offset binary - $\pm 3.3V$出力 - serial output - Conversion rate : 9MHz

サーボシステム設計では、サンプリング周波数が 300kHz 以上であり、式(3.3.3.12)で示される要求されるサーボ帯域より十分に高いことから、まず連続系として設計し、その後、双一次変換にて離散化し、FPGA に実装している。連続系にて設計したサーボフィルタを、次式に示す。

低域補償フィルタ

$$G_1(s) = \frac{5.0 \times 10^{-3} s + 1}{5.0 \times 10^{-3} s} \quad \dots\dots\dots (3.4.3.1)$$

高域補償フィルタ

$$G_2(s) = \frac{8.0 \times 10^{-5} s + 1}{8.0 \times 10^{-6} s} \quad \dots\dots\dots (3.4.3.2)$$

低域補償フィルタとしては、式(3.4.3.1)に示すように、30Hz 以下で積分特性となるチャージポンプフィルタとして、低域ゲインを十分に確保し、DC 成分の偏差をゼロにするために積分型とした。高域補償フィルタとしては式(3.4.3.2)に示すように、2kHz~20kHz の位相をブーストする位相進み補償フィルタとした。サンプリング周波数を 300kHz とした場合の離散フィルタを以下に示す。

低域補償フィルタ

$$H_1(z) = \frac{10003}{10000} \cdot \frac{z - \frac{9997}{10003}}{z - 1} \quad \dots\dots\dots (3.4.3.3)$$

高域補償フィルタ

$$H_2(z) = \frac{1633}{193} \cdot \frac{z - \frac{1567}{1633}}{z - \frac{1267}{1933}} \quad \dots\dots\dots (3.4.3.4)$$

また、演算ディレイとして、ゼロ次ホールドディレイ、AD 変換、DA 変換を行うときのシリアル・パラレル変換ディレイ、AD、DA 変換の演算ディレイ、サーボ演算ディレイがあるが、実測で約 $10\mu\text{sec}$ であった。そこで、 $10\mu\text{sec}$ のディレイを考慮し、式(3.4.1.1)の VCM アクチュエーターモデルに対して、式(3.4.3.3)、式(3.4.3.4)のサーボフィルタにより、サーボシステムの周波数特性をシミュレーションすると図 3.4.3.1 のようになった。

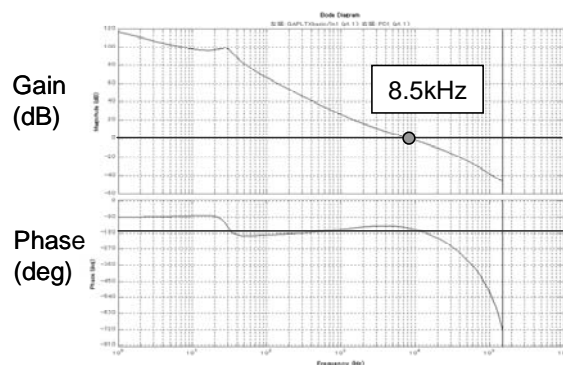


図3.4.3.1 設計されたサーボフィルタの周波数特性(シミュレーション)

図 3.4.3.1 より、サーボ帯域 8.5kHz のリファレンスサーボを満足するギャップサーボシステムが設計できた。なお、ゲイン余裕 5dB、位相余裕 25deg であった。

3.4.4 デジタルフィルタのハードウェア実装化

本節では、式(3.4.3.3)、式(3.4.3.4)の離散フィルタを FPGA への実装について考察する。式(3.4.3.3)、式(3.4.3.4)をブロック図に示すと、図 3.4.4.1 に示すように IIR 型フィルタとして表現できる。なお、以下、固定ゲインについては省略し、ループゲインに調整することになっている。

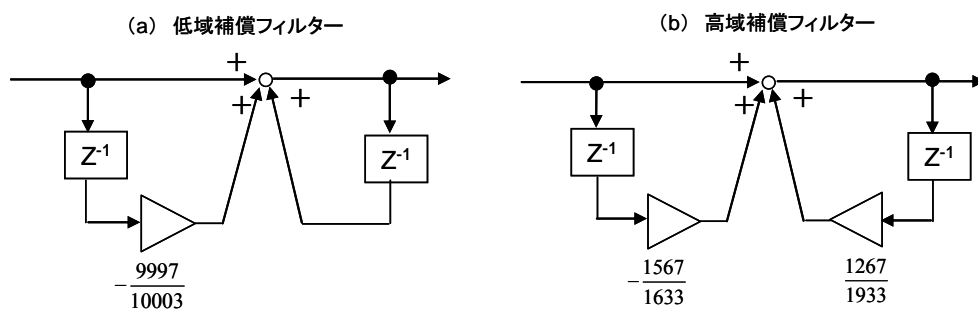


図3.4.4.1 離散化サーボフィルタのブロック図

図 3.4.4.1 に示すように、フィルタの各係数は分数で表現されており割り切れずに無限小数となる。このため浮動小数点にて係数を表現すればよい。ところが、一般的に FPGA は固定小数点演算であり、本研究で用いている FPGA も固定小数点演算型である。そこで、FPGA に図 3.4.4.1 のフィルタを実装するためには、係数を有限長の固定小数点にて近似表現する必要がある。FPGA では、ロジック数からの制限で各係数を 16bit 表現しているため、無限小数をバイナリ化したときにワード長 16bit で打ち切り、FPGA 内部で 16bit \times 16bit の乗算演算にて各係数部演算を行った。図 3.4.4.2 に、高域補償フィルタの例において、浮動小数点演算でのフィルタの周波数特性と 16bit 語長で近似したフィルタを用いた固定小数点演算でのフィルタの周波数特性を示す。

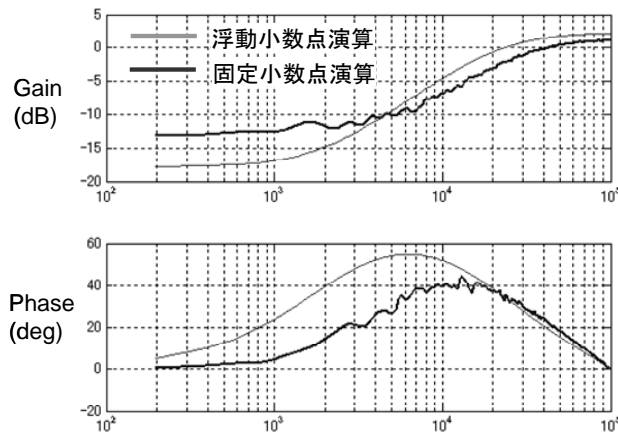


図3.4.4.2 高域補償フィルターの周波数特性の比較
(浮動小数点係数と小数点を有限語長で打ち切った
係数を用いた場合)(シミュレーション)

図 3.4.4.2 より、浮動小数点係数を 16bit 語長で近似した係数によるサーボフィルターを FPGA に実装した場合は、設計したフィルター周波数特性が得られないことがわかる。位相をブーストする中心周波数がずれている上に、位相ブースト量が落ちてしまっている。これは、16bit では bit 数不足で有限語長誤差が大きいことが原因である。例えば、高域補償フィルターの係数である 1267/1933 を例にとると、以下のようになる。

浮動小数点係数

0.655457837558...(3.4.4.1)

16bit 語長近似 (バイナリ表現)

0101001111100110(3.4.4.2)

再小数点化 (16bit 語長近似の再小数点化)

0.655456542969(3.4.4.3)

式(3.4.4.1)で表現される係数は無限小数のため、バイナリ化しても無限に続くが、FPGA への実装化のために 16bit 語長にて打ち切りバイナリ表現すると式(3.4.4.2)となる。これをさらに小数点表示に戻すと、式(3.4.4.3)となる。つまり、フィルター係数としては式(3.4.4.1)が真値なのに対し、実装フィルターの係数は式(3.4.4.3)で示される係数となっており、真値より、0.000001294589.... だけずれている。この実装フィルターの係数値と真値とのずれの問題は、他の係数についても同様である。このために、図 3.4.4.2 に示すように連続系で設計したフィルターを FPGA に実装化することにより、当初の設計したフィルター特性からずれた特性となってしまっている。

また、図 3.4.4.1 に示すように、デジタル化されたサーボフィルターは IIR 型フィルターが縦列接続された形式となっており、前段でのフィルター係数の丸め誤差が後段フィルターに伝搬し、誤差が蓄積されていくことも、真値よりずれてくる原因でもある。

この問題を回避するには、バイナリ表現する bit 数を 16bit 以上に十分長くするか、浮動小数点ができる素子でハードウェアを開発し直すことであるが、前者の場合は FPGA のロジック容量のためにこれ以上増やすのは困難であり、後者の場合は開発コストの問題がある。また、語長を長くすると演算遅延も大きくなるというトレードオフの問題もある。そこで、式(3.4.4.1)をバイナリ表現するために、式(3.4.4.1)をビットシフトによる係数、つまり、 2^n 表現に近似してから FPGA に実装

するように工夫した。具体的には、まず、フィルタ係数を浮動小数点に最も近い値になるように 2^n の次数 n を決定し、次に、実験によるフィルタの周波数特性の実測にて次数 n を微調整するようにした。このように、予め設計されたフィルタ係数を FPGA にて表現しやすい形式に、予め近似変換してから FPGA に実装することにより、図 3.4.4.2 に示すような実装後の特性ずれをなくすように工夫した。

この考えに基づき、低域、高域補償フィルタを 2^n にて近似表現すると次式ようになる。

低域フィルタ

$$H_1(z) = \frac{z - (1 - \frac{1}{2^{10}})}{z - 1} \dots\dots\dots (3.4.4.4)$$

高域フィルタ

$$H_2(z) = \frac{z - (1 - \frac{1}{2^5})}{z - (1 - \frac{1}{2})} \dots\dots\dots (3.4.4.5)$$

図 3.4.4.3 に、高域補償フィルタの場合の連続系、及び、離散化後のフィルタ係数を浮動小数点演算した場合、係数を 2^n 近似化し固定小数点演算した場合の周波数特性の比較を示す。なお、低域ゲインは全て合致するようにして規格化してある。

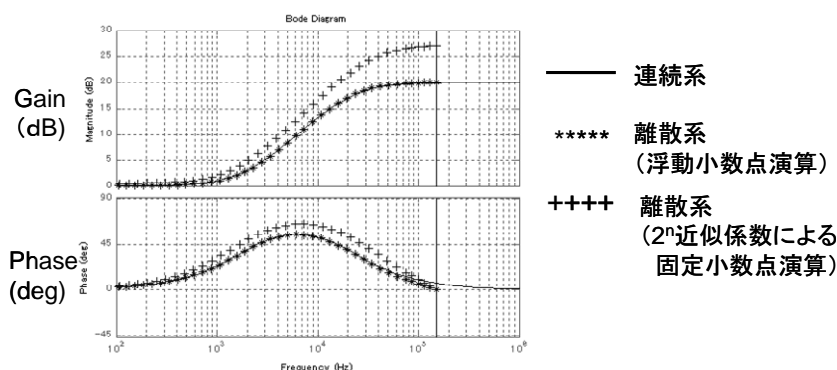


図3.4.4.3 高域補償フィルタの周波数特性の比較

図 3.4.4.3 より、連続系と離散化後のフィルタ係数を浮動小数点化し、かつ浮動小数点演算した場合は完全に合致している。一方、係数を 2^n 近似化し固定小数点演算した場合は、これらとは完全には合致していない。しかし、図 3.4.4.2 で示したようなフィルタの特性不良は見られず、低域から高域にわたり連続系に近い特性を示している。本例の場合では、係数を 2^n 近似することでゲイン、位相特性がむしろ改善している。

以上のようにフィルタ係数を 2^n 表現してから固定小数点演算をする手法では、浮動小数点係数を 2^n 近似するところで連続系設計とのずれが生じるが、一度、 2^n 近似表現した後は、FPGA への実装後に図 3.4.4.2 に示すような設計時に意図しない誤差は生じない。つまり、一度、 2^n 近似表現した後はサーボフィルタ特性が設計通りのデータがハードウェアでも得られることが保証されるのが利点である。

図 3.4.4.5 に、式(3.4.4.4)、式(3.4.4.5)のフィルタブロック図に示す。

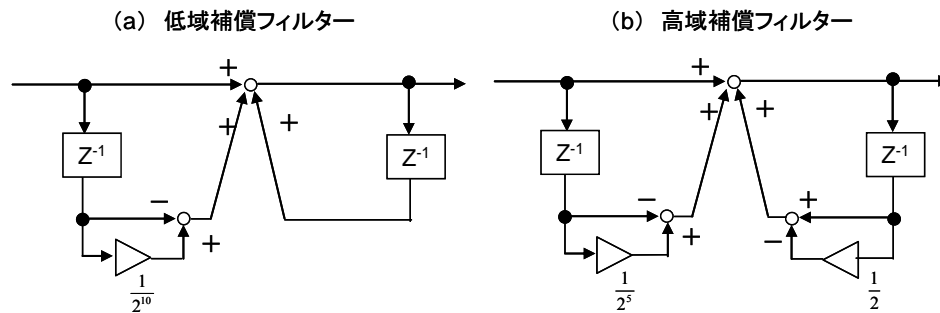


図3.4.4.5 最終的に得られた離散化サーボフィルターのブロック図

式(3.4.4.2)に示すような 16bit バイナリ係数による乗算の場合は、乗算により丸め誤差が蓄積され、図 3.4.4.2 に示すような特性のずれが生じるのに対し、フィルター係数を予め 2^n 近似にしてから実装する場合は、FPGA 内では図 3.4.4.5 に示すようにビットシフト演算のみであり、乗算誤差は全く生じず、また丸め誤差による伝搬は理論的に生じない。つまり、前述のように、一度、フィルター係数を 2^n 近似してしまうことで、係数の近似誤差は生じるものの実装後の誤差は全く生じないことが特徴である。なお、この 2^n 近似時の周波数特性のずれをシミュレーションにて予め考慮して特性を確保すれば問題はない。さらに、フィルター演算を FPGA 内部で行うのに際し、ビットシフトしか行わないため、内部ロジックの消費も抑制できる。フィルター係数を 16bit バイナリで表現し、16bit 演算にてサーボフィルター計算をした場合と比較して、ビットシフトのみでサーボフィルター計算した場合は、ゲート数が 66% も削減できることを確認した。このように、乗算をビットシフト演算化することで、ゲート数の消費を大幅に抑制できる。これは、ゲート数が制限され、また消費するゲート数が増えると、設計ロジックを FPGA にフィッティングする時間が増大し、あるいは困難になってくる FPGA の特性上、有利であると考えられる。

図 3.4.5.5 に本研究で用いた連続系で設計されたサーボシステムを FPGA に実装する流れを示す。

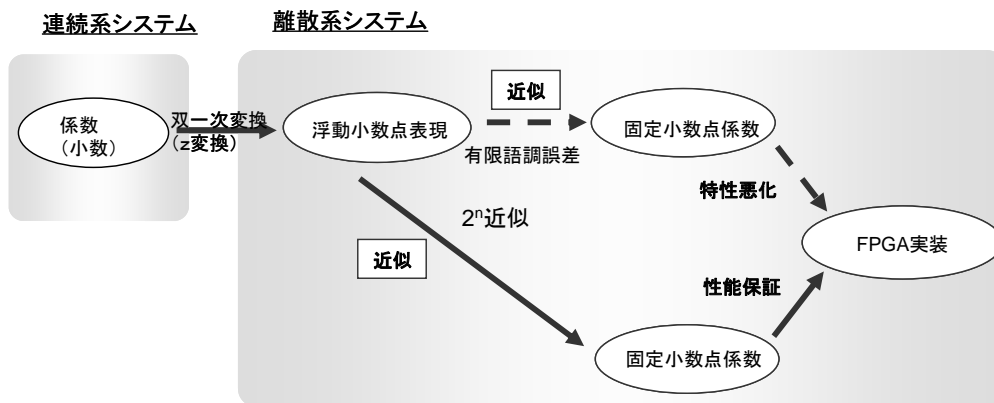


図3.4.4.6 連続系サーボシステムのFPGAへの実装フロー

まとめると、サーボフィルター設計は、図 3.4.4.6 の実線で図示するように、以下の手順により行った。

- ① 連続系にてサーボフィルター設計
- ② サーボフィルターを双一次変換にて離散化
- ③ フィルター係数を 2^n にて近似表現する。
- ④ 2^n 表現された係数にてサーボフィルターを FPGA に実装。乗算はビットシフトにて表現する。

以上が、本研究におけるギャップサーボ用フィルターの設計手順である。②から③のところで、フィルター性能が設計値とずれる恐れがあるが、③において、周波数特性を所望の特性になるように予めフィルター係数を調整することで、③以降で FPGA への実装後のフィルター性能は保証されることになる。

3.4.5 サーボフィルターの評価

サーボフィルターとして式(3.4.4.4)、式(3.4.4.5)を用いて、FPGA に実装し、ギャップサーボループを開発した。実測されたギャップサーボループの周波数特性を図 3.4.5.1 に示す。

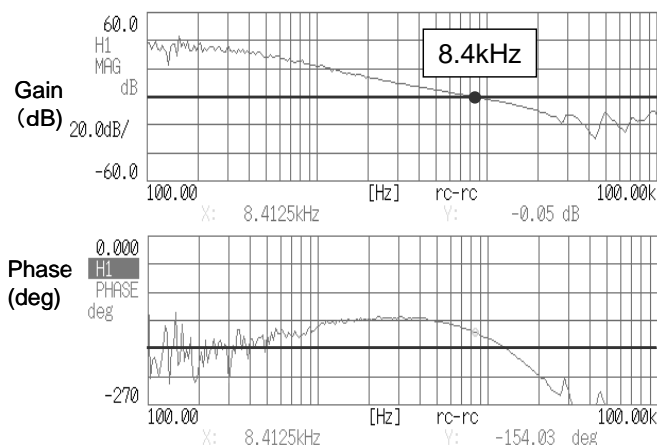


図3.4.5.1 ギャップサーボループ周波数特性(実測)

図 3.4.5.1 よりカットオフ周波数 8.4kHz であった。また、ゲイン余裕は 5dB、位相余裕は 26deg であった。図 3.4.3.1 に示すシミュレーション結果と比較すると、ほぼ設計値通りの性能が得られていることわかり、最大帯域 8.4kHz が実現できた。

次に、設計されたサーボシステムによるギャップサーボについて効果を確認する。図 3.4.5.2 は、目標ギャップ長を 20nm とし、1200rpm で回転するディスク面ぶれ量 $40\mu\text{m}$ のポリカーボネイトディスクに適用した場合のギャップサーボ結果である。なお、この実験では、回転数が 1200rpm であることから、必要ギャップサーボ帯域を、§ 3.4.3 で述べた計算と同様に計算すると 3.1kHz である。そこで、この実験においては、サーボ帯域を落として安定マージンをより確保するために、帯域を 7kHz、ゲインマ余裕 8dB、位相余裕を 35deg として実験を行った[2]。

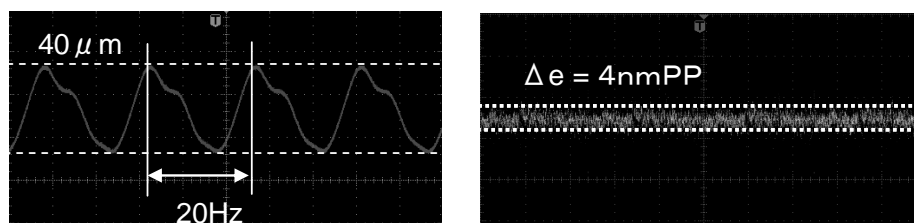


図3.4.5.2 ギャップサーボ結果(面ぶれ量=40 μm ,1200rpm)

ポリカーボネイトディスク基板を用いながら、20nm のギャップ長にて残渣ギャップエラーを 4 nmPP 以下に抑制することに成功している。なお、従来の研究[16][15]が、クリーンな環境でのガラスディスクやシリコンディスクでの実験結果であるのに対し、本実験での結果では、第 2 章 § 2.4 で述べたように、通常のオフィス環境下で、しかも従来の光ディスクシステムと同様な安価なポリカーボネイト基板を用いながら、従来の研究結果での回転数を大きく上回る 1200rpm での実験結

果であることが注目すべき点である。

また、回転数を 570rpm、1200rpm、2100rpm と高速にしていった場合の 12cm ディスクサイズで 70Gbyte 相当の容量の RF 信号、RF エンベロープ、残渣ギャップエラーを図 3.4.5.3 に示す。

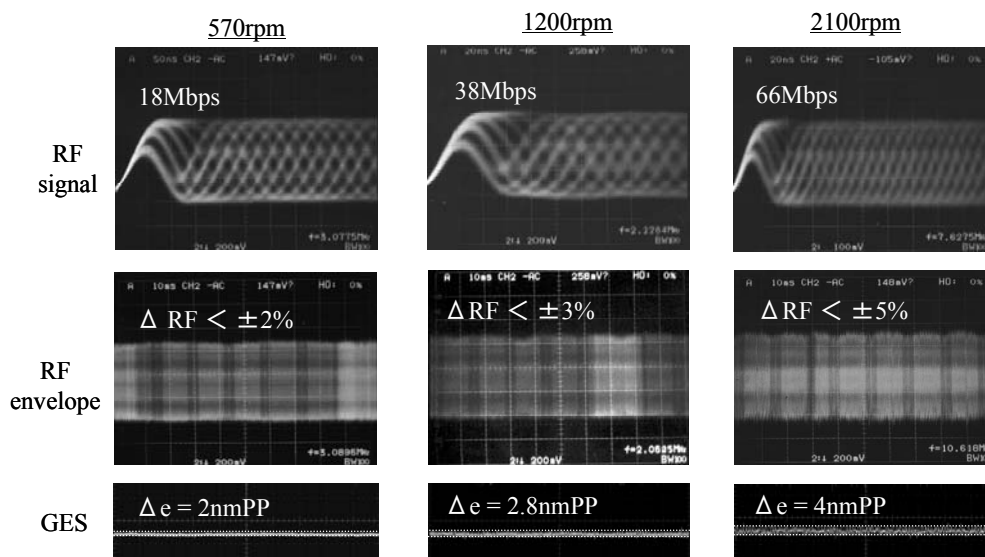


図3.4.5.3 ディスク回転数とRF、RFエンベロープ、GESの様子(面ぶれ11 μm)

図 3.4.5.3 より、§ 3.3.2 で指摘したように、GES が悪化するに比例して RF エンベロープが変動し悪化している。その悪化レートは、実測で 2.5%/nm となっており、理論値である 2%/nm とほぼ合致していることが確認できた。

次に、本研究での目標ディスク回転数である 3000rpm で、目標ギャップ長を 20nm としたときのギャップサーボ性能について評価する。なお、本実験では、図 3.4.5.1 に示す 8.5kHz 帯域にして行ったものである。まず、ディスク面ぶれ量が仕様の約半分である 24 μm で行った結果を図 3.4.5.4 に示す。

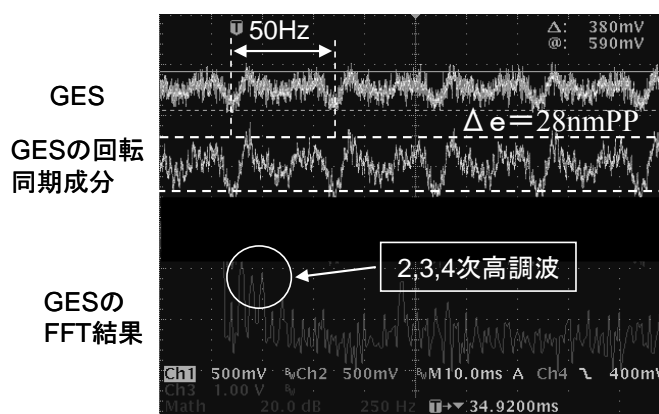


図3.4.5.4 3000rpmでのGESのFFT解析結果(面ぶれ量24 μm)

残渣ギャップエラー量を評価すると 28nmPP となっている。本実験の場合、ディスク面ぶれ量がギャップサーボ設計による許容量である 40 μm 以下の 24 μm でありながら、許容残渣ギャップエラーである 5nmPP を大きく超えてしまい、サーボ仕様を満足していない。つまり、図 3.4.5.1 に示す現在のサーボシステムは、§ 3.3.2 で示したリファレンスサーボを満足していながら、ギャップサーボ仕様を満足していない。この原因を考察すると、図 3.4.5.4 に示すように、2、3、4 次など

の高調波の回転同期の繰り返し成分により、ギャップサーボ性能が悪化していることがわかる。

図 3.4.3.1 に示す現在のギャップサーボの周波数特性（シミュレーションと図 3.4.5.2 で示した実験条件であるディスク回転数 1200rpm、ディスク面ぶれ $40\mu\text{m}$ 、及び図 3.4.5.4 で示した実験条件であるディスク回転数 3000rpm でのリファレンスサーボとの比較（シミュレーション）を図 3.4.5.5 に示す。

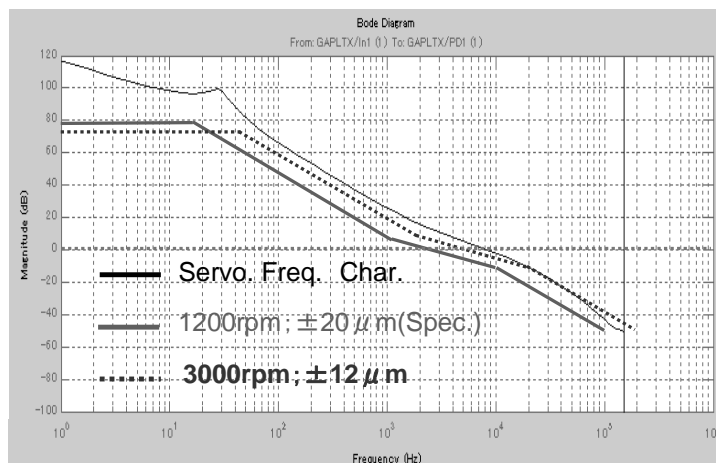


図3.4.5.5 サーボ周波数特性とリファレンスサーボ

ディスク回転数 1200rpm、ディスク面ぶれ $40\mu\text{m}$ の場合では、必要なサーボ帯域が 3.1kHz であり、図 3.4.5.5 より、現状のサーボシステムでは帯域が少なくとも 7kHz 以上であるので、全帯域にわたり約 10dB 以上大きいゲインを有し、十分にディスク面ぶれに追従可能であると考えられる。従って、図 3.4.5.2 での実験結果に示すように繰り返し成分が十分に抑制され、ギャップ残渣エラーが 4nmPP 以下に十分に抑制されていると考えられる。一方のディスク回転数 3000rpm、ディスク面ぶれ $24\mu\text{m}$ の場合では、DC ゲインは十分満足しているものの、回転 1 次成分である 50Hz 以上の周波数において全域にわたりリファレンスサーボの周波数特性より 5dB 以下の余裕しかない。従って、回転同期成分のエラーに対する追従性が不十分となり、図 3.4.5.4 に示すように、回転同期エラー同期成分にて GES が悪化するものと考えられる。従って、ディスク回転数 3000rpm、ディスク面ぶれ量 $40\mu\text{m}$ の条件で許容ギャップ残渣エラーが 5nmPP であるという表 3.3.2.1 に示したサーボ仕様を満足させるためには、回転同期の繰り返し成分に着目し、当該回転同期外乱を抑制すること、及びさらなる高帯域化を図ることでシステム全体のゲインを上げることが考えられる。

3.4.6 繰り返しサーボによるギャップサーボ性能の改善[16]

本節では、学習サーボによるギャップサーボの改善について述べる。図 3.4.6.1 にギャップサーボループのブロック図を改めて示す。ここで、 s はラプラス演算子である。

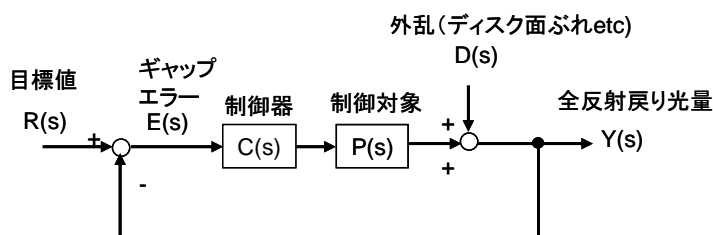


図3.4.6.1 ギャップサーボシステムのブロック図

図 3.4.6.1 において、 $R(s)$ 、 $E(s)$ 、 $P(s)$ 、 $D(s)$ 、 $Y(s)$ は、それぞれ目標値、GES、制御器、制御対象であるアクチュエーター、外乱、被制御量である SIL 端面での全反射戻り光量の伝達関数のラプラス変換である。図 3.4.6.1 より、GES の伝達関数として次式を得る。

$$E(s) = \frac{1}{1 + C(s) \cdot P(s)} R(s) - \frac{1}{1 + C(s) \cdot P(s)} D(s) \quad \dots\dots\dots (3.4.6.1)$$

式 (3.4.6.1) において、第 1 項は目標値に対する追従誤差、第 2 項は外乱に対する追従誤差を示す。内部モデル原理[17][18]によれば、エラー $E(s)$ がゼロに収束するためには、サーボシステムが以下の条件を満足する必要がある。

- ① 閉ループ安定であること
- ② 開ループ伝達関数 $C(s)P(s)$ の極が、領域 $\text{Re}[s] \geq 0$ にある $R(s)$ の極を全て含むこと
- ③ $C(s)$ の極が、領域 $\text{Re}[s] \geq 0$ にある $D(s)$ の極を全て含むこと

である。

目標値 $R(s)$ は本システムの場合、20nm または 25nm に相当する全反射戻り光量であり一定値である。従って、 $R(s)$ はステップ応答として、伝達関数は以下のように表現できる。

$$R(s) = \frac{K}{s} \quad \dots\dots\dots (3.4.6.2)$$

内部モデル原理①、②の条件から、 $C(s)P(s)$ として $1/s$ 、つまり積分項を含むことが式(3.4.6.1)の第 1 項をゼロとする条件となる。§ 3.4.1 において式(3.4.1.1)より、 $P(s)$ には $1/s$ を含まれないが、式(3.4.3.1)より制御器 $C(s)$ には $1/s$ を含む。従って、本システムにおけるギャップサーボシステムにおいて、目標値に対する追従誤差は完全にゼロとすることが可能である。

一方の外乱に対する追従誤差について考える。光ディスクシステムの場合、回転体システムであるため、外乱はディスク面ぶれであり、かつ回転同期信号として表現できる。従って、回転周期を T とすると、ディスク面ぶれ信号 $d(t)$ は、1 回転での波形 $\alpha(t)$ を以下のように表現できる[19]。

$$d(t) = \sum_{k=0}^{k=+\infty} \alpha(t - kT) \quad \dots\dots\dots (3.4.6.3)$$

但し、 $t \geq 0$

式(3.4.6.3)をラプラス変換すると、次式のようになる。

$$D(s) = \sum_{k=0}^{k=+\infty} e^{-T \cdot k \cdot s} A(s) = \frac{A(s)}{1 - e^{-Ts}} = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \frac{\alpha_k}{s - j \frac{2\pi k}{T}} \quad \dots\dots\dots (3.4.6.4)$$

ただし、

$$A(s) = \int_0^T \alpha(t) \cdot e^{-ts} dt$$

$$\alpha_k = \frac{1}{T} A(j \frac{2\pi k}{T})$$

式(3.4.6.4)より、回転同期外乱 $D(s)$ は、複素平面の虚軸上に等間隔の無限数の極を有する。したがって、内部モデル原理①、③の条件から、 $D(s)$ の影響を除去して、式(3.4.6.1)の第 2 項をゼロにするには、 $C(s)$ として、 $D(s)$ と同様に複素平面の虚軸上に等間隔の無限数の極を有する必要がある。

つまり、 $\frac{1}{1 - e^{-Ts}}$ の項を含む必要がある。このようなシステムとして、図 3.4.6.2 に示すむだ時間要素を含む繰り返し制御システムが考えられる。図 3.4.6.2 にむだ時間要素を含むサーボシステム例を示す。

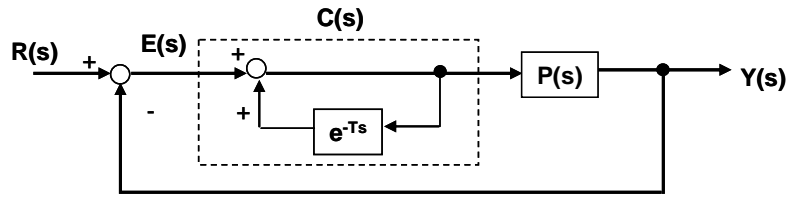


図3.4.6.2 繰り返し制御系(理想系)

図 3.4.6.2 において、制御器 $C(s)$ の伝達関数は、次式のようになる。

$$C(s) = \frac{e^{-Ts}}{1 - e^{-Ts}} \quad \dots\dots\dots (3.4.6.5)$$

式(3.4.6.5)より、制御器 $C(s)$ は、 $\frac{1}{1 - e^{-Ts}}$ を含むことから、内部モデル原理から周期外乱 $D(s)$ の影響を除去することができる。しかしながら、システムの安定性を考えると、現実的には完全な除去をするのは困難である。これは以下の理由による。

図 3.4.6.2 より、 $E(s)$ は次式のように表せる。

$$E(s) = \frac{1}{1 + \frac{e^{-Ts}}{1 - e^{-Ts}} \cdot P(s)} D(s) = \frac{e^{Ts}}{e^{Ts} - 1 + P(s)} \cdot D(s) \quad \dots\dots\dots (3.4.6.6)$$

$P(s)$ は、式(3.4.1.1)より厳密にプロパーであることから、 $s \rightarrow \infty$ にて、 $P(s) \rightarrow 0$ となる。また、 $s = j\frac{2\pi \cdot k}{T}$ とすると、虚軸上の等間隔にて $e^{Ts} = 1$ を満足する。従って、虚軸上の無限遠点にて、式(3.4.6.6)の分母である $e^{Ts} - 1 + P(s) \rightarrow 1 - 1 + 0 = 0$ となり、安定性が保証されなくなる。そこで、この問題を解決するためには、むだ時間要素内に適当な帯域のローパスフィルタ $F(s)$ を入れることで、 $P(s) = 0$ が成立しないようにし、サーボシステムの安定性を損なわないようにする。さらに、実用的には、繰り返しエラー成分に、適当なゲイン k を乗じてからフィードフォワードするようにする。この場合のサーボブロック図を、図 3.4.6.3 に示す。

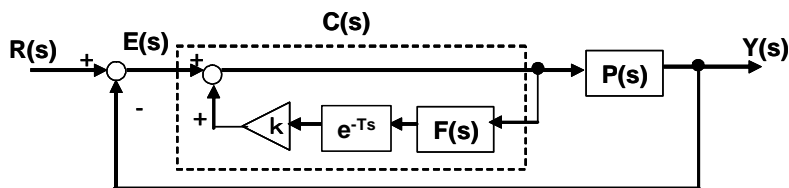


図3.4.6.3 繰り返し制御系(実用系)

図 3.4.6.3 において、 $F(s)$ のゲイン $= 1$ となるローパスフィルタの帯域内であれば、図 3.4.6.2 に示す理想系となるため、周期外乱 $D(s)$ の影響を完全に排除することが可能となる。 $F(s)$ のゲイン $\neq 1$ となるローパスフィルタの帯域外では、繰り返し入力であるフィードフォワード入力が小さくなっていくことから、繰り返し入力がない場合の図 3.4.6.3 のシステムに近くなっていく。従って、周期外乱 $D(s)$ の影響が排除できなくなってくる。また、図 3.4.6.3 においてゲイン k を調整することで、フィードフォワード入力を調整することが可能となる。 $k \rightarrow 0$ になると、結局、繰り返し入力がない場合の図 3.4.6.1 のシステムに近くなっていく。従って、周期外乱 $D(s)$ の影響が排除できなくなってくる。 k をだんだんと大きくしていくと、繰り返し外乱に対するゲインが大きくな

ってくる。図 3.4.6.4 に k を変化させたときの繰り返し制御器の周波数特性例（シミュレーション）を示す。

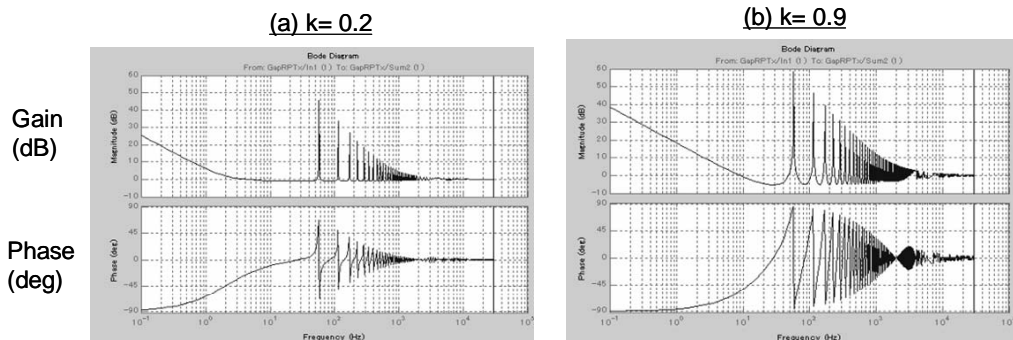


図3.4.6.4 繰り返し制御器の周波数特性
(繰り返し基本周波数45Hz、 $F(s)$ の帯域=1.2kHz)

図 3.4.6.4 に示すようにゲイン k を大きくするにつれて、繰り返し周波数のピークゲインが大きくなり、繰り返し成分の抑制効果が強くなる。しかしながら、繰り返しピークゲイン幅がせまくなり、少しでもピークを外れると抑制効果が小さくなってしまう。このため、ゲイン k を単に大きくしても必ずしもサーボ性能が向上するわけではない。ローパスフィルタ $F(s)$ 、ゲイン k が設定できる範囲は、システムの安定性から次式を満足させる必要がある[20]

$$|k \cdot F(s)| < |1 + C(s) \cdot P(s)| \quad \dots\dots\dots (3.4.6.7)$$

本研究では、式 (3.4.6.7) に示す範囲内で、かつ GES が最小になるように、ゲイン k とローパスフィルタ $F(s)$ の帯域を調整して評価した。また、ローパスフィルタとしては 1 次のものを用いた。

ところで、繰り返し制御器の実装には、図 3.4.6.3 に示すように 1 周期分のディレイが必要である。本研究では、1 回転 500 分割の回転同期信号を出力するエンコーダー付きのスピンダルモーターを用い、1 回転分のディレイを 500 サンプルディレイ出力とすることで実現した。図 3.4.6.5 に本研究において学習サーボとして導入した繰り返し制御器を組み込んだギャップサーボシステムのブロック図を示す。

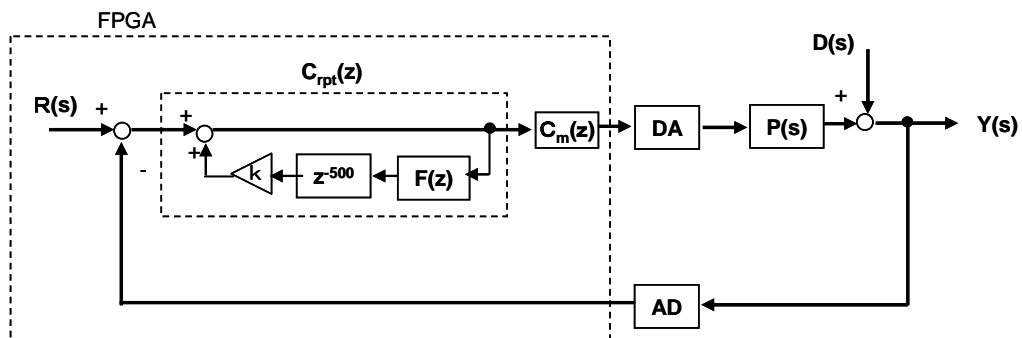


図3.4.6.5 繰り返し制御を実装したギャップサーボシステム

図 3.4.6.5 において、 $C_{rpt}(z)$ 、 $C_m(z)$ は、それぞれ繰り返し制御器、メインループの制御器であり、FPGA にて実装されている。メインループの制御器は、§ 3.4.3 で設計したものを用いている。

フィードバックループ系のサーボ帯域が 8kHz、繰り返し基本周波数が 55Hz の場合の周波数特性（シミュレーション）を図 3.4.6.6 に示す。

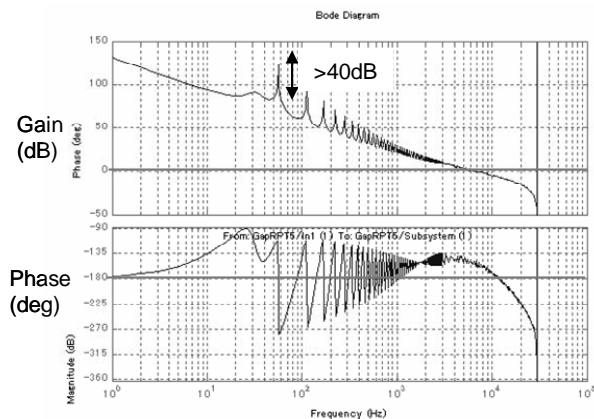


図3.4.6.6 繰り返しサーボ内蔵ギャップサーボの周波数特性(シミュレーション)

図 3.4.6.6 に示すように、回転同期成分に対して、最大 40dB 程度のピークゲインが得られる。また、図 3.4.6.5 に示すように、繰り返しサーボは、常に 1 回転前の信号をフィードフォワード信号としてサーボループに入力することから、回転が変化しても適応的に追従が可能であり、回転数に応じたピークゲインが得られる特徴がある。光ディスクシステムの場合、ディスクをクランプする毎にディスク面ぶれ量、ディスク面ぶれ波形が異なり、半径に依存して変化する。また、線速度一定のシステムの場合、半径に応じてディスク回転数も変化する。このような場合に対しても、繰り返しサーボによれば、適応的にディスク回転数に対応可能であるので、近接場光ディスクシステムにおけるギャップサーボシステムに対して極めて有効であると考えられる。

図 3.4.6.7 に、ポリカーボネイトディスクを用いて、ディスク回転数 3000rpm、ディスク面ぶれ量 21 μ m、目標ギャップ長 20nm の場合の繰り返しサーボ前後のギャップエラーを示す。これは、§ 3.4.5 で示した図 3.4.5.4 での実験とはほぼ同等な実験条件である。図 3.4.6.7(a)は帯域 8kHz のフィードバックサーボのみの場合で、図 3.4.6.7(b)は、繰り返しサーボを併用した場合である。フィードバックサーボのみの場合は、残渣ギャップエラーが 22nmPP である。これは、§ 3.4.5 で示した図 3.4.5.4 での実験と同等な結果を示しており妥当である。これに対し、本節にて導入した繰り返しサーボを併用することにより、残渣ギャップエラーは 12nmPP となり、フィードバックサーボだけの場合に対して約 50%の低減に成功している。図 3.4.6.7(b)に示すように、GES を悪化させる要因である繰り返し成分が効率よく除去され、うまく抑制されていることがわかる。

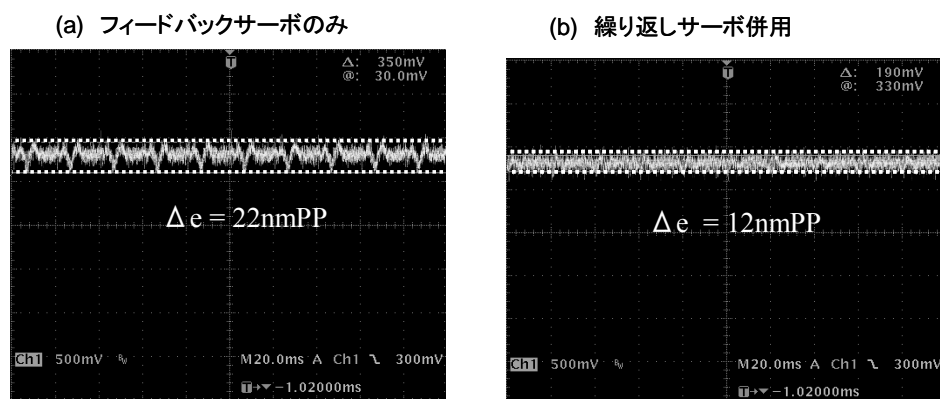


図3.4.6.7 繰り返しサーボ適用前後のギャップエラー

しかしながら、繰り返しサーボを導入しても、ディスク面ぶれ量が表 3.3.2.1 に示したギャップ

サーボ仕様値の約 1/2 であるにもかかわらず満足させることができなかった。そこで、次節では、別な手法として、さらなるサーボの高帯域化によるギャップサーボ性能の向上について述べる。

3.4.7 高帯域化によるギャップサーボ性能の改善 [16]

§ 3.4.5 では、リファレンスサーボを満足するサーボ帯域 8.4kHz によるギャップサーボについて述べた。しかしながら、このギャップサーボシステムではギャップサーボ仕様を満足しないことから、前節 § 3.4.6 ではギャップエラーの回転同期成分に注目し、繰り返しサーボを導入することでギャップサーボ性能を向上出来ることを示した。

本節では、ギャップサーボの帯域を今まで以上に高帯域化することで、ギャップサーボ性能を改善する手法について述べる。

まず、現状のシステムにおけるサーボ帯域の限界を調べた。§ 3.4.5 における図 3.4.5.1 において、サーボゲインを上げていき、ギャップサーボシステムが発振する限界の周波数を調べた。そのときのカットオフ周波数近傍の周波数特性を図 3.4.7.1 に示す。

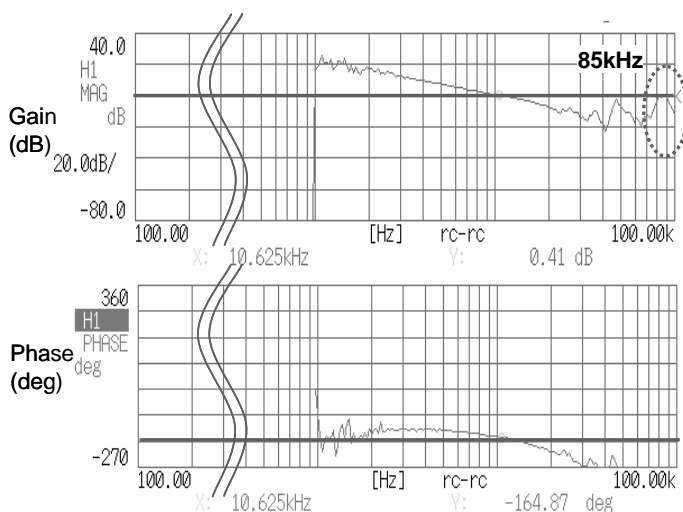


図3.4.7.1 現状のギャップサーボシステムの限界帯域

図 3.4.7.1 において、サーボ帯域は 10.6kHz、ゲイン余裕 3dB、位相余裕 26deg であった。これ以上にゲインを上げると、図 3.4.7.2 に示すようにギャップサーボが、85kHz で発振してしまった。一度発振してしまうと、システムが不安定状態になり、ギャップサーボを停止して、再び近接場状態へ引き込もうとしても困難であった。

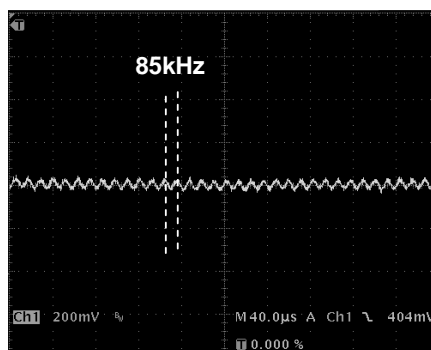


図3.4.7.2 ギャップサーボの発振(85KHz)

図 3.4.7.1 より VCM アクチュエーターの高次共振に起因する 50kHz 近傍、85kHz 近傍の高次共

振成分がゼロクロス近傍にあり、共に発振の原因となる可能性があるが、図 3.4.7.2 より後者の 85kHz 共振の方が発振を誘発しており、50kHz 共振の方は問題ないことがわかった。そこで、85kHz 近傍の高次共振成分が抑制できれば、さらにサーボ帯域を上げられると考えられる。85kHz は、ギャップサーボ帯域である 10kHz 程度よりも十分に高い。そこで、ギャップサーボループ内において、共振を誘発する 85kHz の信号成分をノッチフィルターで抑制することで、共振を抑制するようにした。この手法はハードディスクドライブでも効果的に用いられている手法である[21]。

本研究において用いた中心周波数 85kHz のノッチフィルターの伝達関数を、式(3.4.7.1)に示す。また、この伝達関数の周波数特性を図 3.4.7.3 に示す。

ノッチフィルター (中心周波数 85kHz)

$$G(s) = K \cdot \frac{s^2 + 2.857 \times 10^{11}}{s^2 + 1.02 \times 10^5 s + 2.857 \times 10^{11}} \quad \dots\dots\dots (3.4.7.1)$$

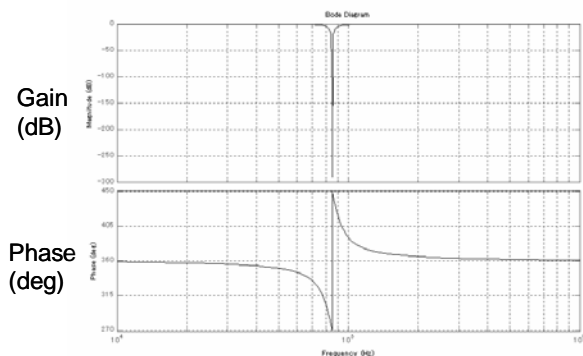


図3.4.7.3 ノッチフィルターの周波数特性(中心周波数85KHz)

図 3.4.7.4 に、上記のノッチフィルターを図 3.4.7.1 に適用した場合のカットオフ周波数近傍のギャップサーボループの周波数特性を示す。

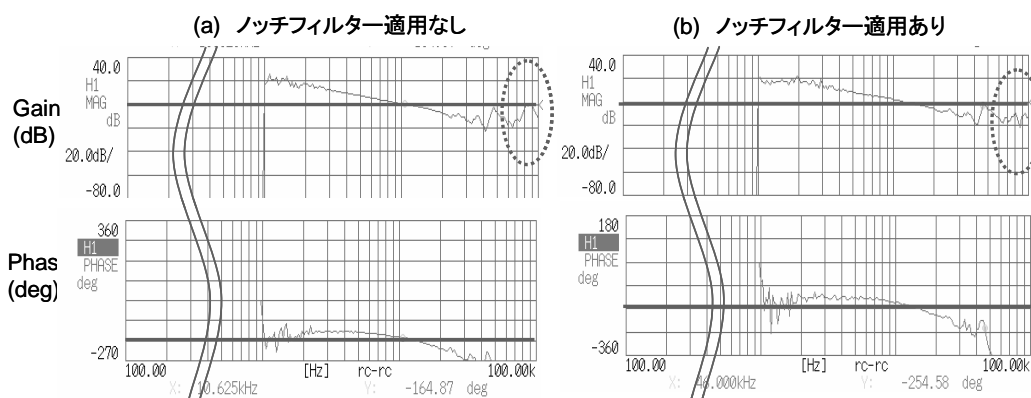


図3.4.7.4 ノッチフィルターによる共振抑制効果

図 3.4.7.4 より、ノッチフィルターを適用することで、問題となる 85kHz 共振が抑制されていることがわかる。これにより、VCM アクチュエーターの動特性に起因する発振が抑制され、図 3.4.7.1 に示すサーボ帯域である 10.6kHz 以上へと帯域の拡大が可能であると考えられる。しかし、単にこの状態でゲインを大きくしても安定余裕が小さくなり、今度はサーボループが不安定になり発振してしまう恐れがある。そこで、帯域拡大に伴う安定余裕の減少を抑制するために、さらに次の 2 つ

の改善を行った。

- ① サンプリング周波数を現状の 300kHz から、本研究で用いているシリアル型 AD 変換の上限サンプリング周波数である 350kHz に改善
- ② 帯域周辺部の位相余裕改善のために位相進みアナログフィルタを追加

①に関して、サンプリング周波数を上げたことによる高域のデジタル位相進み補償の位相改善効果を図 3.4.7.5 に示す。図 3.4.7.5 に示すように位相が -180 を横切る周波数が 16kHz から 20kHz まで改善された。

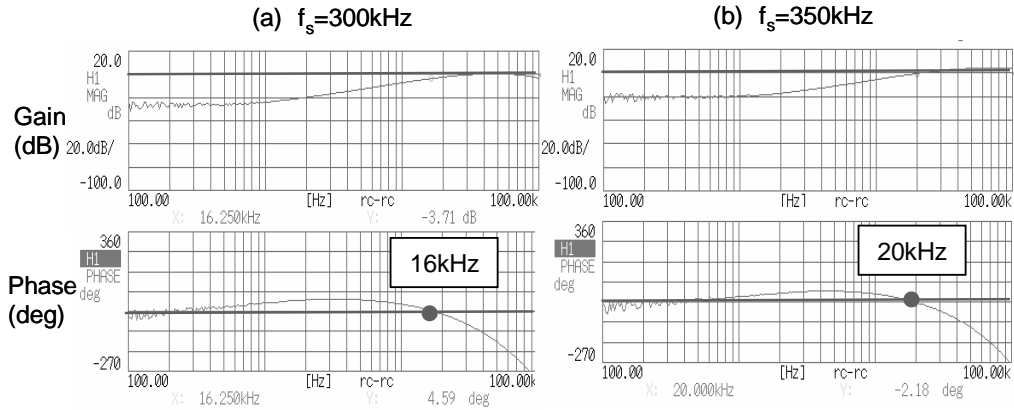


図3.4.7.5 サンプリング周波数改善による高域補償フィルタの位相改善

②に関しては、AD、DA 変換ディレイ、デジタル演算ディレイによる位相周りのため、デジタルフィルタだけではこれ以上の高域周波数を補償するフィルタ設計は困難であった。そこで、高域部（10kHz～21kHz）での位相余裕を改善するために、式(3.4.7.2)に示すような当該高域部の位相を改善するアナログの位相進み補償を追加した。高域補償の補助フィルタの周波数特性を図 3.4.7.6 に示す。

高域補償補助フィルタ

$$G(s) = \frac{1.5 \times 10^{-5} s + 1}{6.8 \times 10^{-6} s + 1} \dots\dots\dots (3.4.7.2)$$

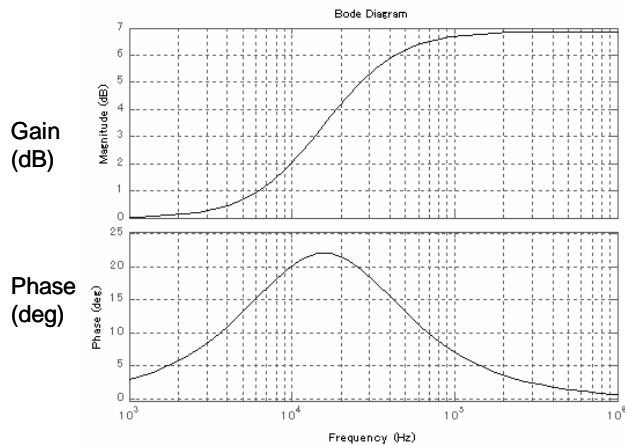


図3.4.7.6 カットオフ周波数部の安定度の改善用フィルタ

このようにデジタルフィルタとアナログフィルタを組み合わせることで高域部の余裕を改善する手法はハードディスクドライブでも効果的に用いられている手法である[21]。

以上、アクチュエーターに起因する高次共振を抑制するノッチフィルタ、高域部の位相特性を改善する補助フィルタの導入、サンプリング周波数の向上により、得られた最終的なギャップサーボの周波数特性のシミュレーション結果を図 3.4.7.7 に示す。

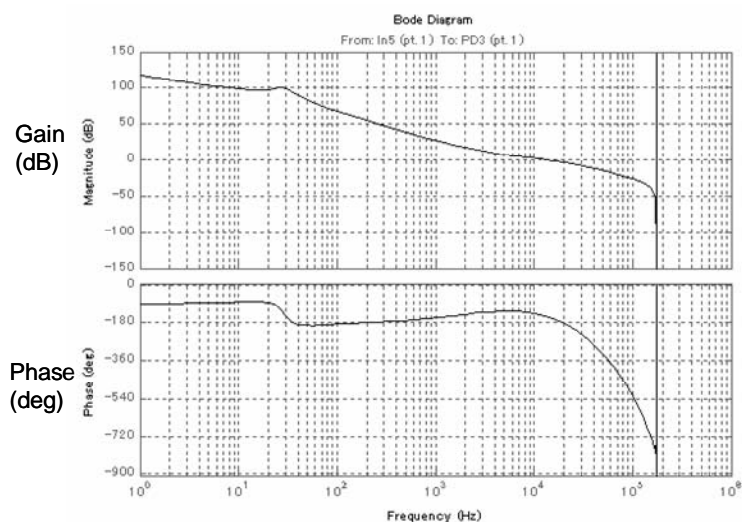


図3.4.7.7 高帯域ギャップサーボの周波数特性(シミュレーション)

シミュレーション結果によれば、サーボ帯域 13kHz でゲイン余裕 5dB、位相余裕 35 deg であった。この結果をもとに、サーボシステムを開発した。最終的に得られたギャップサーボシステムの周波数特性の実測値を図 3.4.7.8 に示す [16]。

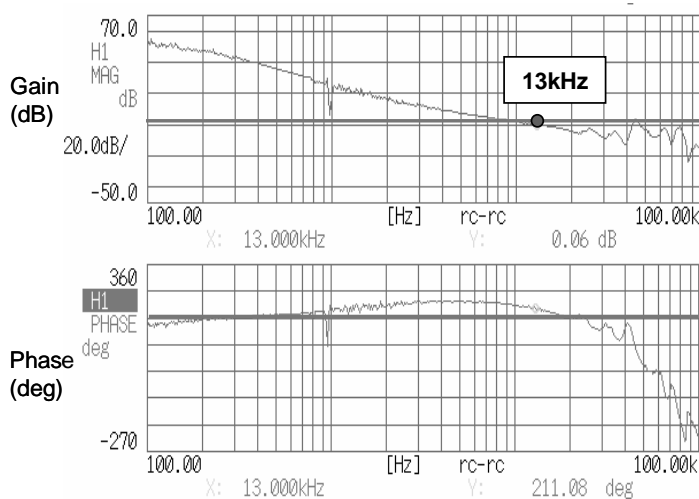


図3.4.7.8 高帯域化ギャップサーボループの周波数特性($f_c=13\text{kHz}$)

図 3.4.7.8 に示すように、ギャップサーボ帯域を 13kHz まで高帯域化に成功した。また、ゲイン余裕は 5dB、位相余裕は 31deg であり、図 3.4.7.7 の設計値と同等な結果が得られていることが確認できた。従来の光ディスクシステムにおいて、Blu-ray でさえリファレンスサーボフォーマットによる要求帯域で 3.5kHz、実際のドライブシステムでも 8kHz 前後である。本研究による帯域 13kHz のサーボシステムは世界最高レベルであり、筆者の知る限り例がない。

図 3.4.7.9 に、図 3.4.6.7 と同一の条件、つまり、ポリカーボネードディスクを用いて、ディスク

回転数 3000rpm、ディスク面ぶれ量 $21\mu\text{m}$ 、目標ギャップ長 20nm の場合のギャップサーボの高帯域化前後のギャップエラーを示す。図 3.4.7.9(a)は帯域 8kHz の場合で、図 3.4.7.9(b)は帯域 13kHz の場合である。

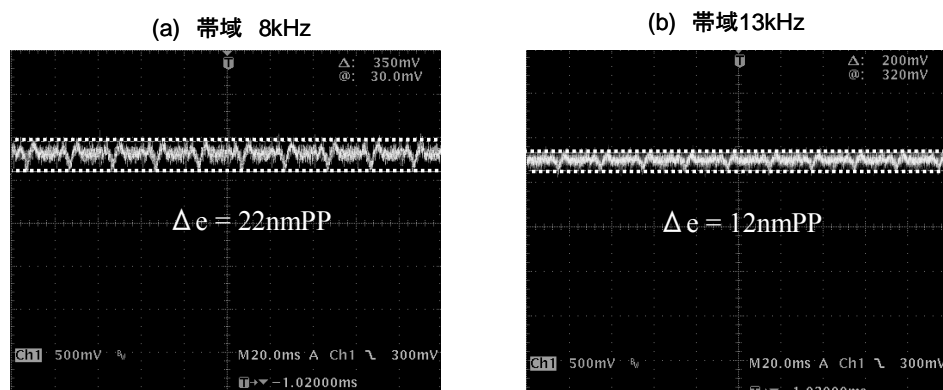


図3.4.7.9 高帯域ギャップサーボシステムの効果

帯域が 8kHz の場合が、残渣ギャップエラーが 22nmPP であるのに対し、サーボ帯域を 13kHz に高帯域化することで、残渣ギャップエラーが 12nmPP まで改善している。つまり、図 3.4.6.7 に示すように帯域 8kHz にて繰り返しサーボを併用した結果と同様に約 50%改善している。図 3.4.6.7 と図 3.4.7.9 を比較すると、最終的な残渣ギャップエラーは同じであるが、その結果を得るための手法の違いが良く現れていることがわかる。つまり、図 3.4.6.7 では、サーボ帯域を変えずに繰り返しサーボを導入することで、回転同期のエラー成分を抑制し 12nmPP の残渣ギャップエラーを達成している。一方の図 3.4.7.9 では、サーボ帯域を高帯域化することで、ギャップエラー成分をサーボ帯域全域にわたり抑制することで 12nmPP の残渣ギャップエラーを達成している。しかしながら、ギャップサーボ帯域を 13kHz まで高帯域化しても、ディスク面ぶれ量が表 3.3.2.1 に示したギャップサーボ仕様値の約 1/2 であるにもかかわらず、満足させることができなかった。図 3.4.7.9(b)をみると繰り返し成分が見受けられることがわかる。つまり、サーボ帯域を高帯域化しても依然として残留している繰り返し成分によりギャップサーボ性能が悪化していると考えられる。従って、高帯域化サーボに繰り返しサーボを導入することで、さらなるギャップサーボの改善が期待できると考えられる。次節では、高帯域化サーボと繰り返しサーボとのハイブリッドサーボについて述べる。

3.4.8 ハイブリッドサーボによるギャップサーボ性能の改善[16]

ギャップサーボ性能を改善するには、§ 3.4.6 で述べた繰り返しサーボによる手法と § 3.6.7 で述べたサーボループの高帯域化による手法の 2 つがある。前者の手法は、内部モデル原理に基づくもので、ギャップエラーがディスク回転数に同期することに着目し、ギャップエラーから抽出されたディスク 1 回転分の繰り返しエラーを学習し、フィードフォワード制御を行うことでギャップサーボ性能を改善するという手法である。後者の手法は、サーボ帯域を高帯域化することで、DC ゲインのみならず帯域内のゲインをより大きくし、また追従帯域を広げることでギャップサーボ性能を改善するという手法である。本節では、これらの 2 つの手法を組み合わせることで、ギャップサーボ性能をさらに改善することを行い、最終的な目標であるディスク回転数 3000rpm、ディスク面ぶれ量 $40\mu\text{m}$ にて、5nmPP の残渣ギャップエラーの達成を目指す。

ディスク回転数 3000rpm、ディスク面ぶれ量 $45\mu\text{m}$ のディスクに対して実験した結果を図 3.4.8.1 に示す。本実験では、ディスク面ぶれ量が表 3.3.2.1 に示したギャップサーボ仕様値に近い値となっている。

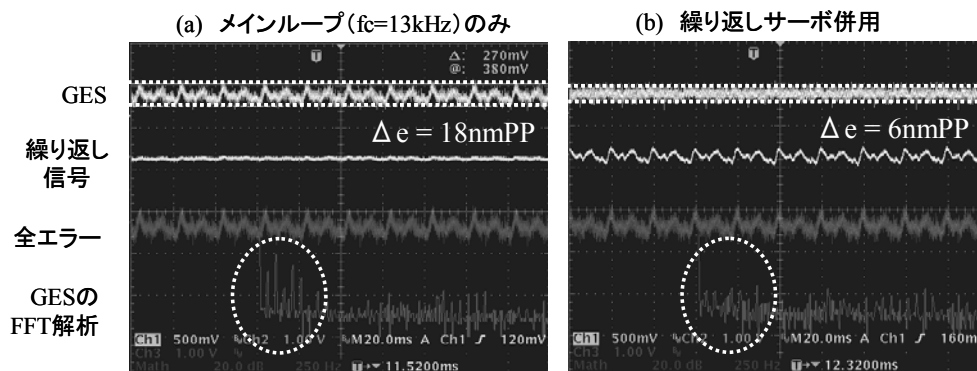


図3.4.8.1 高帯域サーボと繰り返しサーボによるハイブリッドギャップサーボ結果

図 3.4.8.1(a)は、帯域 13kHz のフィードバックサーボのみを適用した結果である。残渣ギャップエラーは、18nmPP であり、GES を FFT 解析すると、回転周波数の 1 次～6 次成分が強く影響していることがわかる。このシステムにおいて、繰り返しサーボを適用した結果が、図 3.4.8.1(b)である。学習前後で GES に重畳している繰り返し信号がうまく学習されて、GES に見受けられた繰り返し成分である回転周波数の 1 次～6 次成分が抑制されていることがわかる。その結果、GES の残渣エラーが 66%改善され、6nmPP まで改善され、表 3.3.2.1 に示したギャップサーボ仕様値をほぼ満足させることに成功した。厳密に言えば、残渣ギャップエラーがサーボ仕様値の 5nmPP を 1nmPP 上回っているが、実験時のディスク面ぶれ量が $45\mu\text{m}$ となっており、サーボ仕様値の $40\mu\text{m}$ より大きくなっているからであることを考慮すると妥当であると考えられる。

そこで、実際に、サーボ仕様値であるディスク回転数 3000rpm、ディスク面ぶれ $40\mu\text{m}$ に対して、本節で述べたハイブリッドサーボを適用し、残渣ギャップエラーを評価した。その結果を図 3.4.8.2 に示す。

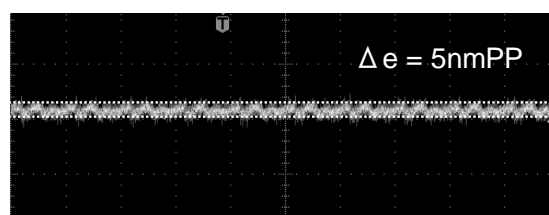


図3.4.8.2 ギャップサーボ仕様値でのギャップサーボ結果
(ディスク回転数3000rpm、ディスク面ぶれ量 $40\mu\text{m}$)

結局、図 3.4.8.2 より、サーボ帯域 13kHz の高帯域ギャップサーボと繰り返しサーボを組み合わせることによるハイブリッドギャップサーボにより、ディスク回転数 3000rpm においてディスク面ぶれ量 $40\mu\text{m}$ を許容し、残渣ギャップエラー 5nmPP にて SIL とディスク間のギャップを 20nm または 25nm に安定に保持することができ、開発目的が達成できた。

3.5 プルインシステム

3.5.1 開発課題

前節までは、近接場状態になった後で、ディスク回転時の $40\mu\text{m}$ 程度のディスク面ぶれに追従してギャップ長を 25nm 程度に一定に保持するギャップサーボ技術について論じた。

本節では、ファーフィールド状態から近接場状態への引き込み手法について述べる。

近接場光ディスクシステムでは、ディスクがシステムにローディングされたときに、SIL とディスクが衝突しないように、予め SIL とディスク間のギャップはある程度離されている。本研究のシステムでは、SIL はディスク表面から $300\mu\text{m}$ 程度離されている。この初期位置から、 25nm 程度の近接場領域に SIL をディスクに衝突させることなく移動させる技術が必要となる。

近接場光ディスクシステムにおけるファーフールドから近接場への SIL の引き込み技術を、本論文ではプルイン技術と呼ぶ。近接場のプルイン技術は、従来の光ディスクシステムにおけるフォーカスのプルイン技術に相当するものであるが、近接場特有の特徴があり、多くの点で異なる。図 3.5.1.2 にファーフールド光学系と近接場光学系のプルイン過程の比較を示す。

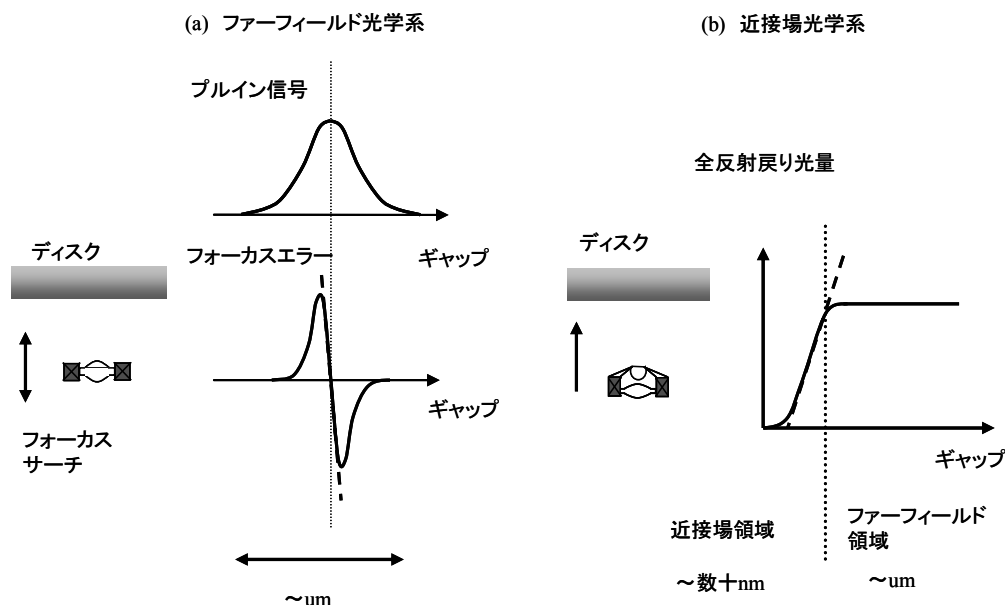


図3.5.1.2 ファーフールド系とニアフィールド系のプルイン過程の比較

図 3.5.1.2(a)は、CD、DVD、Blu-ray などの従来の光ディスクシステムであるファーフールド光学系のフォーカス引き込み過程を示しており、代表的な例として非点収差法[3]を示してある。図 3.5.1.2(b)は、近接場光学系のギャップ引き込み過程を示しており、本論文で述べている光学式ギャップサーボ手法によるものである。ファーフールド光学系において第1章 § 1.4 図 1.4.1 でも示したように、フォーカス時の対物レンズとディスク間のギャップは Blu-ray でも $500\mu\text{m}$ 程度はあり、近接場光学系と比較して十分に離れた距離でフォーカス进行することになる。このため、フォーカス进行前のフォーカスサーチ動作として、フォーカス点を探すためにフォーカス点を中心としてレンズアクチュエーターをディスク面に前後方向に摺動させることが可能となる。このフォーカス動作により、図 3.5.1.2 に示すようなプルイン信号とフォーカスエラー信号が得られる。プルイン信号は、再生 RF 信号の低域成分に相当し、フォーカス点にて振幅が最大となる。また、フォーカスエラー信号はフォーカス点前後で正負の値を取り S 字カーブと呼ばれている。S 字カーブのフォーカス点前後のギャップ長とフォーカスエラー信号との関係が線形になる領域においてフォーカスサーボを動作させることで、フォーカスエラーがゼロなるようにレンズアクチュエーターとディスク間が一定に維持される。この線形となる範囲、つまり引き込み範囲は、Blu-ray でも $10\mu\text{m}$ 程度はある。

一方の近接場光学系は、ギャップとギャップエラーとの関係が線形となるのは数十 nm 程度以下の近接場領域のみであり、それ以上のギャップではファーフールド状態となりギャップに比例したギャップエラー信号が得られない。つまり、サーボ系に対しては不感帯となり、サーボが不可能である。また、この微小な引き込み範囲のために、ファーフールド系でのフォーカスサーチに相

当するレンズアクチュエーターの摺動動作は不可能であり、ファーフールドから近接場への引き込みは1回で成功させる必要がある。また、引き込み時において、狭ギャップのために数十 nm 程度のオーバーシュートも許容されないという極めて厳しい条件となっているのが特徴である。

本節では、光学式ギャップサーボ方式において、ディスク表面から 25 nm 程度の近接場領域に引き込むためのプルイン技術について述べる。

本節では、ランプ入力によるプルイン技術について述べる。本手法を用いたプルインシステムのブロック図を図 3.5.2.1 に示す。

図3.5.2.1 近接場プルインシステム

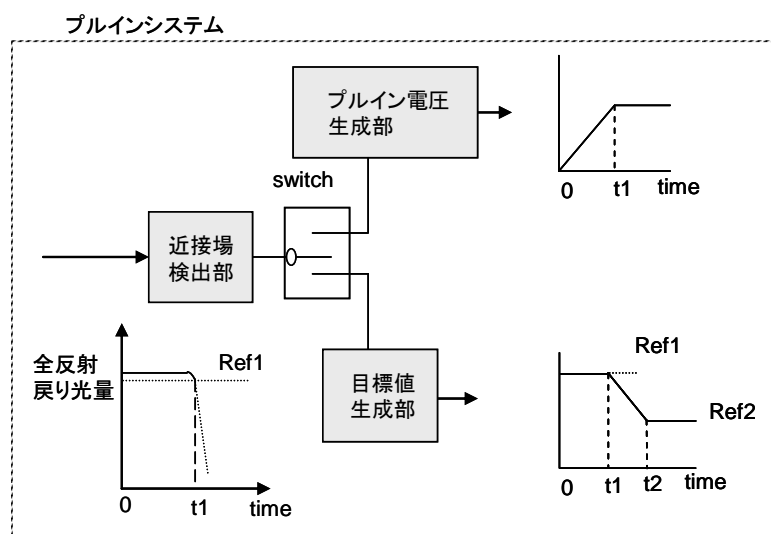


図3.5.2.2 プルインシステム

図 3.5.2.3 に近接場状態を検出する仕組みを示す。

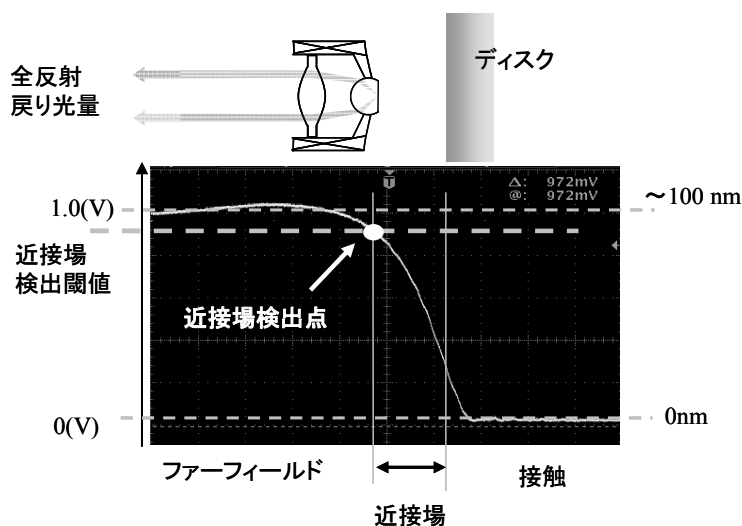


図3.5.2.3 近接場状態の検出手法

§ 3.2.2 で述べたように、SIL 端面における全反射戻り光量は近接場状態では、SIL 端面で全反射するので一定値であり、SIL とディスク間のギャップが代表的に約 100nm 以下の近接場状態になると一部の光が SIL 端面からディスク側に透過するので全反射戻り光量は減少し、SIL 端面とディスクが完全に接触したとき、全反射戻り光量はゼロとなる。そこで、まず、ファーフールド状態における SIL 端面での全反射戻り光量を規格化する。本実験では 1.0V に規格化した。そして、1.0V 以下で、かつ目標ギャップ長に相当する全反射戻り光量電圧以上の任意の位置に近接場状態を検出するための閾値を設定する。この近接場検出閾値電圧と全反射戻り光量電圧を比較し、近接場検出閾値電圧が全反射戻り光量電圧より小さくなった時点をも、SIL が近接場状態になったと判断する。これが、図 3.5.3.2 に示す時刻 t_1 である。近接場状態になったらプルイン電圧をホールドして SIL のディスクへの接近を停止し、ギャップサーボを開始すると同時に、ギャップ目標値をギャップ目標値生成部にて発生させる。

図 3.5.2.4 にギャップサーボのブロック図を示す。

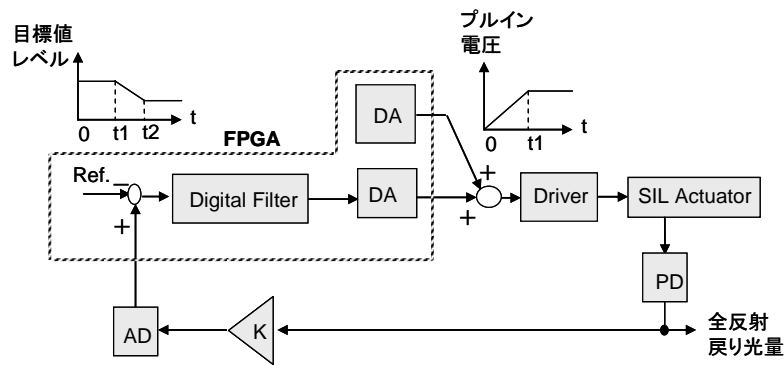


図3.5.2.4 ギャップサーボブロック図

図 3.5.2.4 において、ギャップサーボ目標値は、ステップ応答的に最終的な目標値に設定されるのではなく、図 3.5.2.5 に示すように近接場状態が検出された時点での電圧値を開始値、最終的な目標値電圧を終了値として線形的に変化させる。図 3.5.2.4 においては、時刻 $t_1 \sim t_2$ まで変化させることに相当する。ギャップサーボはこの時間変化する目標値にて最終的なギャップに制御される。

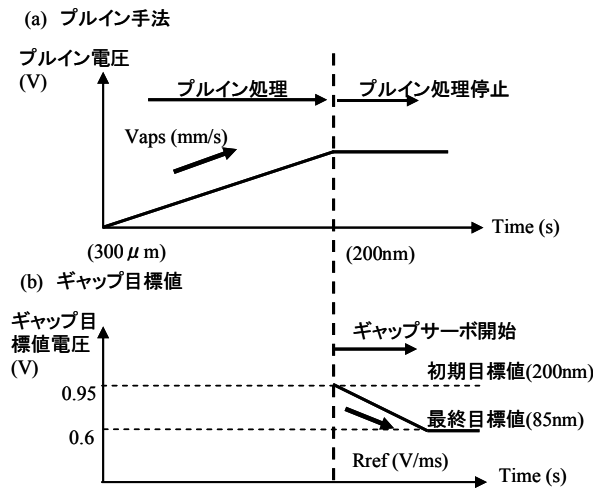


図3.5.2.5 接近電圧と目標値の関係

この手法においては、プルイン電圧である SIL のディスク接近速度と目標値可変速度の最適化が重要となる。そこで、次にこれらの最適化の検討結果を述べる。

なお、本実験においては、ディスクとしてガラス基板を用い、ギャップサーボとして図 3.5.2.6 に示す帯域 2.5kHz のシステムを用いている。ディスク基板としてガラス基板を用いているので、ディスク面ぶれとしては、 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 程度であり、ギャップサーボ帯域としては十分である。

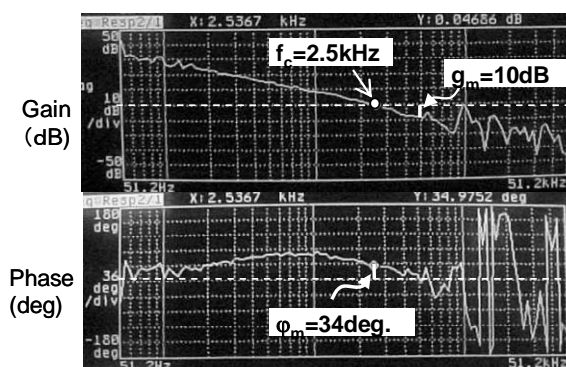


図3.5.2.6 本節でのギャップサーボ周波数特性

また、SILの初期位置はディスクから $300\mu\text{m}$ 離れた位置とし、ファーフールドでの全反射戻り光量電圧を $1.0(\text{V})$ に規格化し、近接場検出電圧を 0.95V と設定した。これは、本実験で用いているガラス基板の場合、 200nm に相当する。また、ギャップ目標値は 85nm とした。これは、全反射戻り光電圧としては 0.6V に相当する。

プルイン電圧、目標値変化速度を最適化するにあたり用いた評価項目を図 3.5.2.7 に示す。

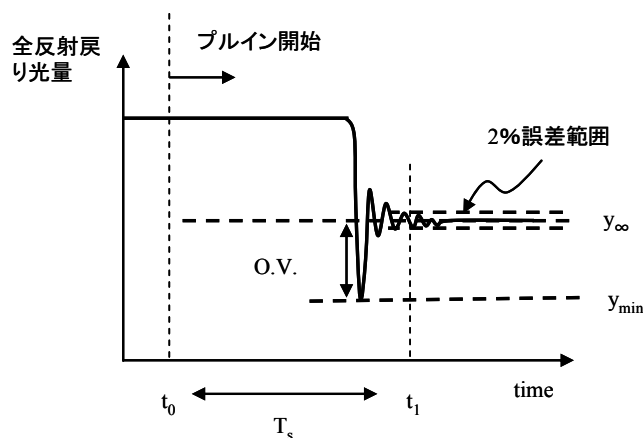


図3.5.2.7 評価項目

本実験では、評価項目として、オーバーシュート量 O.V.、整定時間 T_s を用いる。それぞれ、図 3.5.2.7 に示すように式(3.5.3.1)にて定義される。

$$O.V. = \frac{y_{\infty} - y_{\min}}{y_{\infty}} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots (3.5.2.1)$$

また、整定時間 T_s は、式(3.5.3.2)にて定義される。

$$T_s = t_1 - t_0 (\text{sec}) \quad \dots\dots\dots (3.5.2.2)$$

プルイン速度、目標値速度の最適化の目標としては、オーバーシュートが最小かつ整定時間が最小になることとした。まず、目標値を固定し、プルイン速度を可変状態にし、プルイン速度とオーバーシュートの関係、及びプルイン速度と整定時間の関係（シミュレーション）を調べた。この結果を図 3.5.2.8 に示す。

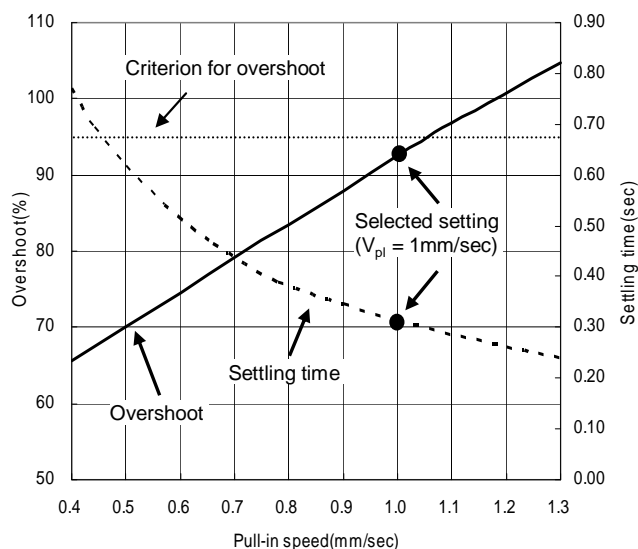


図3.5.2.8 プルイン速度とオーバーシュートまたは整定時間の関係

ギャップサーボ開始時の SIL 移動速度はギャップサーボに対して速度外乱として影響を及ぼす。従って、図 3.5.2.8 に示すように、プルイン速度が高速になるほどオーバーシュートが大きくなる傾向がある。逆に整定時間の観点で考えると、プルイン速度が高速に比例して整定時間は短くなる。オーバーシュート量が 100%であることは SIL がディスクに衝突していることを意味する。例として、ディスクから $300\mu\text{m}$ の初期位置からギャップサーボを開始したときの GES の実測の様子を図 3.3.2.9 に示す。

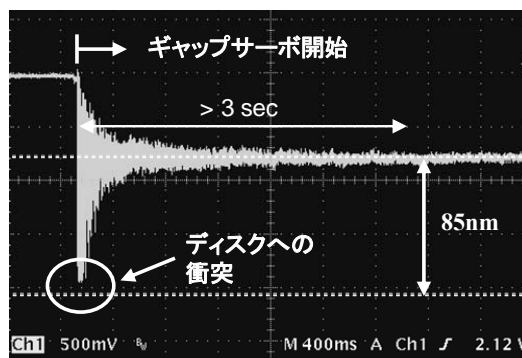


図3.5.2.9 初期位置からギャップサーボ開始した場合の様子

図 3.5.2.9 に示すように、SIL はディスクに激しく衝突し、その後 SIL が振動しながら目標ギャップ長に引きこまれており、結果として整定するのに 3 秒以上かかってしまっている。さらに、SIL がディスクに衝突してしまうことから、SIL とディスクが破壊される恐れがある。このため、プルイン速度を単純に高速化することはできない。逆に、プルイン速度を遅くしていくと、オーバーシュートが抑制されて、引き込み時に SIL がディスクに衝突する可能性が小さくなるものの、整定時間が大きくなり非実用的なシステムとなる。図 3.5.2.10 に、プルイン速度 $3.0\mu\text{m/s}$ としたときの GES の実測の様子を示す。

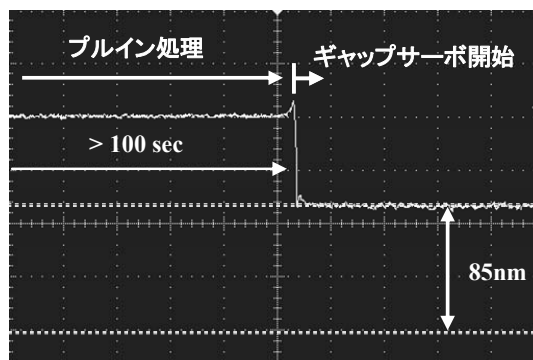


図3.5.2.10 近接場状態へ低速で接近($3\mu\text{m/sec}$)

図 3.5.2.10 に示すように、オーバーシュートが抑制されて、SIL がディスクに衝突する恐れはない。しかしながら、本例の場合、引き込み時間が 100 秒以上かかってしまい、実用的なシステムとは言えない。

そこで、図 3.5.2.8 において、SIL がディスクに衝突しないための条件として、オーバーシュートの許容量として 95%と設定し最大のプルイン速度を調べた。この結果、図 3.5.2.8 より、最適なプルイン速度が 1.0m/s と求められた。この時、整定時間は 313msec であった。このときの GES の様子（シミュレーション）を図 3.5.2.11 に示す。

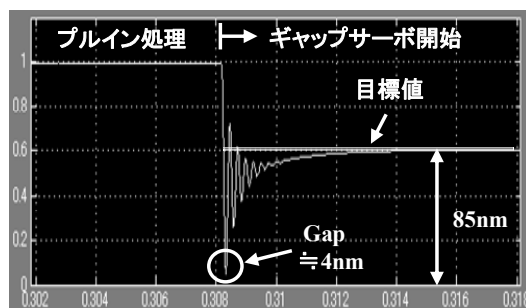


図3.5.2.11 プルイン速度1.0m/s、目標値一定のときの引き込みの様子(シミュレーション)

図 3.5.2.11 より、再接近時の SIL とディスクとのギャップ長は 4nm であり、衝突は回避されている。図 3.5.2.12 に実測した GES の様子を示す。

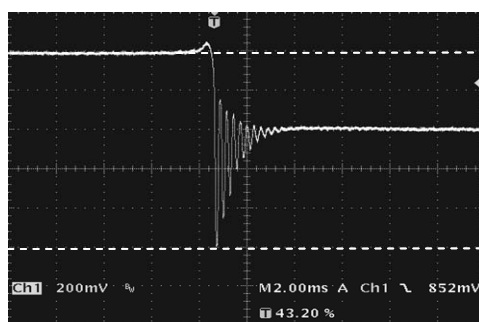


図3.5.2.12 プルイン速度1.0m/s、目標値一定のときの引き込みの様子(実測値)

図 3.5.2.12 より、実システムにおいてもシミュレーションにて得られた最適プルイン速度 1.0m/s によりシミュレーションと同等な結果が得られていることが確認された。

次に、プルイン速度を最適値である 1.0m/s に固定し、目標値の変化率を可変にしたときのオーバーシュート量、整定時間をシミュレーションにより調べた。その結果を図 3.5.2.13 に示す。

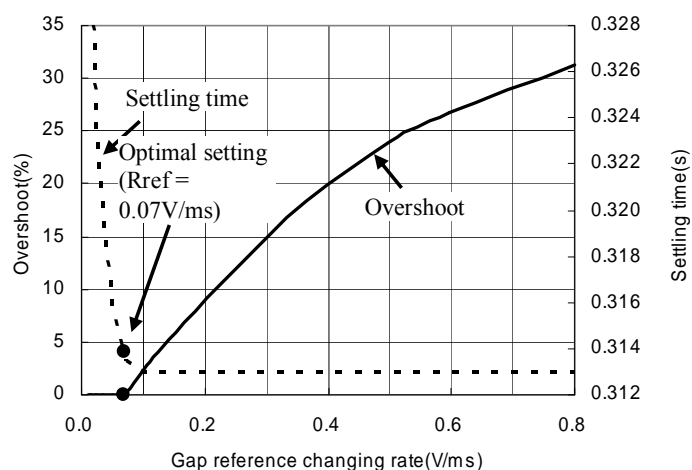


図3.5.2.13 目標値変化率とオーバーシュートまたは整定時間の関係

図 3.5.13 より、オーバーシュートが最小でかつ整定時間が最短となる目標値変化速度を求めると、0.07V/msec となる。この最適値の目標値変化速度より小さくする、または大きくしていくと図 3.5.2.14 のようになる。

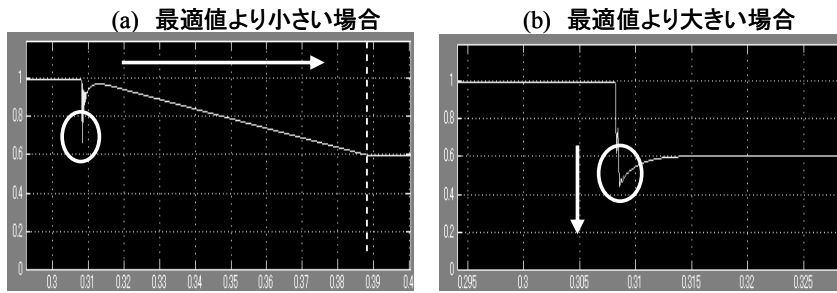


図3.5.2.14 最適な目標値変化速度前後のGESの様子（シミュレーション）

図 3.5.2.14(a)は最適値より小さい場合である。この場合、目標変化率に依存して整定時間が長くなる。また、オーバーシュート量については、目標変化率が小さいほどギャップサーボ開始前後で、目標値がほとんど変化しなくなりほぼ一定値となることから、ギャップサーボ開始時の速度外乱に対するギャップサーボ応答によるオーバーシュート量ではほぼ一定となる。図 3.5.2.14(b)は最適値より大きい場合である。この場合、目標変化率に依存して整定時間は、ファーフィールド状態から近接場状態までのSILの移動速度が支配的となってきた、ほとんど一定となる。一方、オーバーシュート量については、目標変化率が大きいほど目標値への追従性が悪化して大きくなる傾向がある。この結果、オーバーシュートが最小かつ、整定時間が最小となる目標変化率が存在し、それが最適値となる。図 3.5.2.15 に最適な目標値変化速度でのGESのシミュレーション結果を示す。

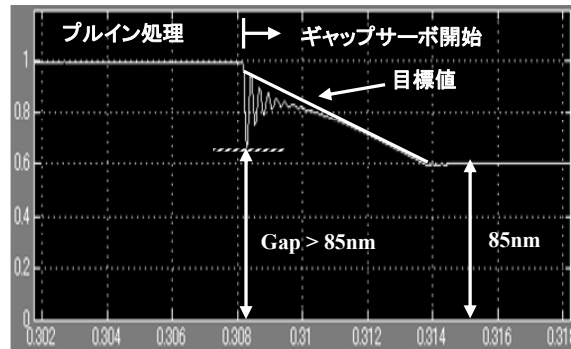


図3.5.2.15 最適な目標値変化率でのGESの様子（シミュレーション）

図 3.5.2.15 より整定時間は314msecであり、図 3.5.2.15 より、最接近時のSILとディスクとのギャップ長は85nmとなり、衝突が十分に回避されている。

以上より、1.0mm/sでSILを接近させ、近接場状態になった後に、0.07V/msecで目標値を変化させることで、SILがディスクに衝突することなく、300μmの初期位置から314msecで85nmのギャップ目標値に引き込むことが可能であることがわかった。シミュレーションで得られた最適設定を用いて、実際のシステムに適用した結果を図 3.2.15.16 に示す。

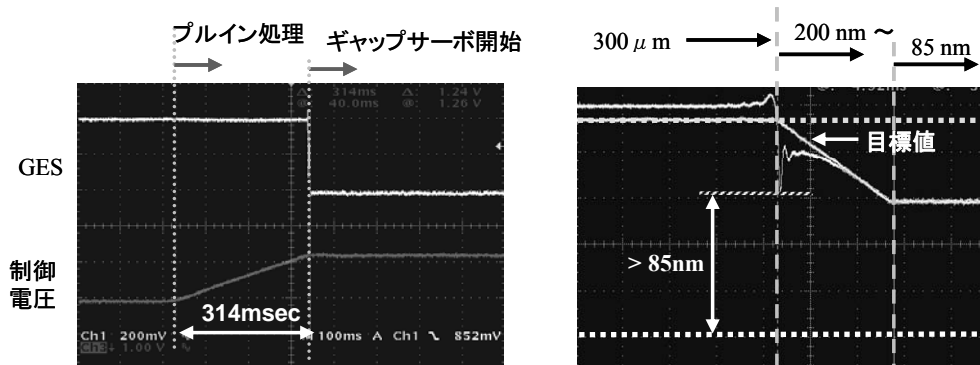


図3.5.2.16 最適な目標値変化率でのGESの様子（実測）

図 3.5.2.16 より、実システムにおいてもシミュレーションによる結果と同等な結果が得られており、 $300\mu\text{m}$ の初期位置から 314msec で 85nm のギャップ目標値に引き込むことに成功した。

3.5.3 改良型プルイン手法[2]

前節で述べたプルイン手法では、初期位置から近接場状態に SIL を移動させる方法としてランプ電圧を用いていた。また、ギャップ目標値を線形的に変化させていた。引き込み電圧としてランプ電圧を用いるとギャップサーボ開始時に SIL が初速度を有し、ギャップサーボに対して速度外乱となるため、目標値へ完全追従は難しい。そこで、速度外乱の影響によりオーバーシュートが生じることを前提として、オーバーシュートによる SIL のディスクへの衝突抑制をしつつ、整定時間を最短にするようにプルイン速度と目標値変化速度を最適化していた。

本節では、前節でのプルイン手法を改善して、整定時間を悪化させることなく、引き込み時オーバーシュートを完全に抑制し、目標値に完全に追従する引き込み手法について述べる。

本手法の基本構造は図 3.5.2.1 と同様であるが、図 3.5.2.2 において、プルイン電圧生成方法と目標値生成方法を改善し、図 3.5.3.1 に示すように改善した。

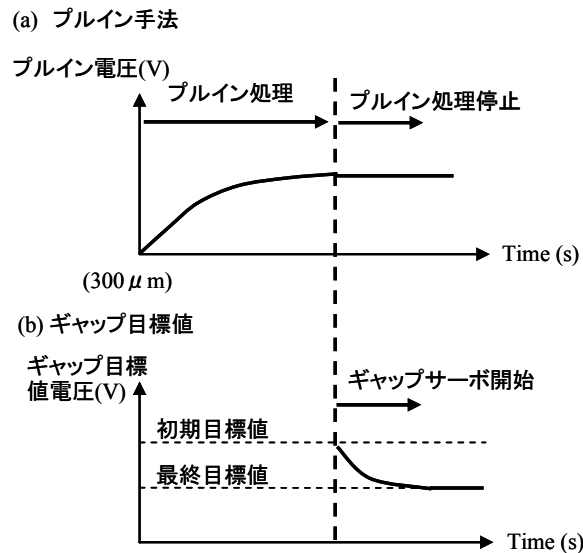


図3.5.3.1 接近電圧と目標値の関係

まず、プルイン電圧については、図 3.5.2.5(a)のようなランプ状入力から図 3.5.3.1(a)に示すような電圧に改善した。このプルイン電圧はギャップサーボを開始するタイミングで発生されたステップ状プルイン電圧を適当なプルイン電圧フィルターを通すことで得られる。プルイン電圧フィルターとしては、1 次のローパスフィルターとした。この理由については後述する。また、ステップ電圧値は $300\mu\text{m}$ の初期位置からディスク表面に SIL が移動するのに必要な電圧値を計測し、初期設定として予め設定しておくようにした。図 3.5.3.2 に改善前後のプルイン電圧値の波形を示す。

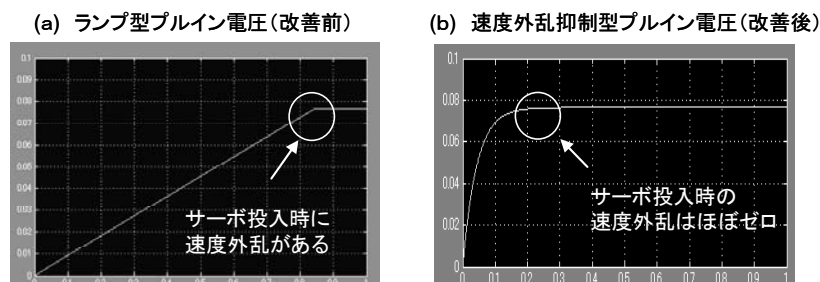


図3.5.3.2 プルイン電圧の改善

プルイン電圧の傾きが SIL の速度となる。図 3.5.3.2(a)のようなランプ状電圧では、ギャップ開始時において SIL にランプ電圧が印加されている状態となる。従って、ギャップサーボ開始時にある速度を有することになり、これがギャップサーボ開始時の速度外乱となり、オーバーシュートの原因となっていた。そこで、プルイン電圧を図 3.5.3.2(b)に示すような電圧波形に変更し、プルイン電圧が一定になったところでギャップサーボを開始する。このようにすれば、ギャップサーボ開始時のプルイン電圧の傾きはほぼゼロなり SIL の速度はゼロとなるため、速度外乱を抑制することが可能となる。図 3.5.3.3 に、本手法によるプルイン電圧を印可したときの SIL をレーザードップラー計で測定した結果を示す。図 3.5.3.3 では、プルイン開始直後は 0.005m/s となるが、その後、VCM アクチュエーターによる 2 次系振動特性により振動しながら減速し、プルイン電圧の傾きがゼロになったところで、SIL の速度もゼロとなっている。従って、SIL の移動速度がゼロになったところでギャップサーボを開始することで、速度外乱を抑制することが可能となる。

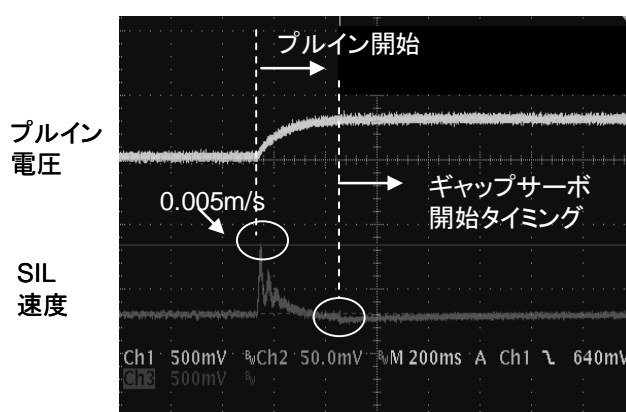


図3.5.3.3 プルイン時のSIL速度

次に、プルイン電圧を規定するローパスフィルターの時定数を決定する。図 3.5.3.3 に示すようにプルイン電圧印加開始直後はアクチュエーターが振動的となり、整定時間後に振動がなくなる。したがって、プルイン電圧を規定するローパスフィルターの時定数より短いと SIL が振動している可能性がある。そこで、プルイン電圧を規定するローパスフィルターの時定数としては、アクチュエーターの整定時間と等価になるように設定した。図 3.5.3.4 に本実験で用いた VCM アクチュエーターのステップ応答 (シミュレーション) を示す。

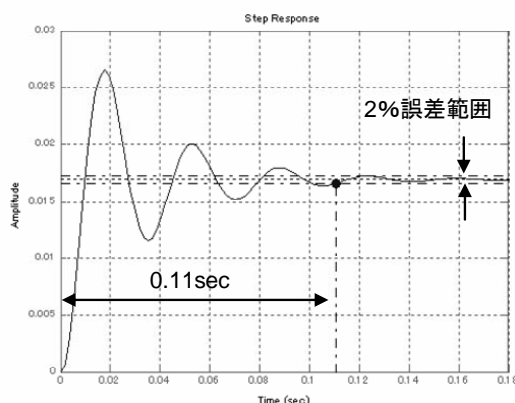


図3.5.3.4 アクチュエーターのステップ応答(シミュレーション)

図 3.5.3.4 より、最終目標値の 2%以内になる整定時間は、0.11sec となることから、これをプルイン電圧の時定数として設定した。従って、プルイン電圧の伝達関数は、式 (3.5.3.1) のようになる。また、 $K_p=1$ とした場合のステップ応答 (シミュレーション) を図 3.5.3.5 に示す。

$$G(s) = \frac{K_p}{0.02s + 1} \dots\dots\dots (3.5.3.1)$$

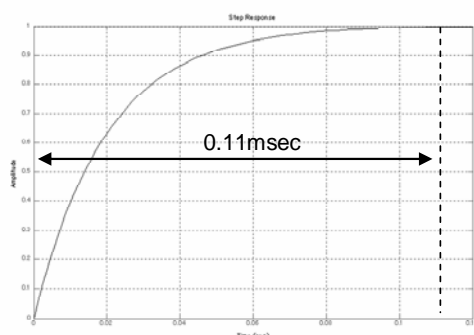


図3.5.3.5 プルイン電圧(シミュレーション)

300 μ m の初期位置からディスク表面に SIL が移動するのに、表 3.4.1.1 より DC 感度は 2.01mm/V であることから、0.15V となる。つまり、0.15V を VCM アクチュエーターに印加すればよい。なお、本実験では、プルイン電圧発生回路部と VCM アクチュエーター間のゲインを考慮して、プルイン電圧値は 30mV となるように調整しており、このようにゲイン K を設定した。

次に、目標値生成方法であるが、近接場光ディスクシステムのプルインサーボ手法として目標値フィルター型 2 自由度制御系を導入する [25]。このシステムのブロック図を図 3.5.3.6 に示す

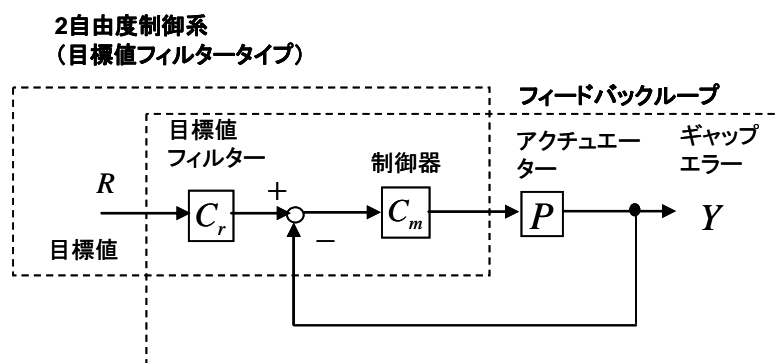


図3.5.3.6 2自由度型プルインサーボシステム

ここで、§ 3.4.6 で述べた繰り返しサーボ系が動作するのは、近接場状態へのプルイン動作が完了して、ディスクが 1 回した学習後なので、プルインサーボの検討においては省略して考える。また、各パラメーターは、それぞれの伝達関数のラプラス変換を表している。また、図 3.5.3.6 において、 C_m は § 3.4.7 で導入した帯域 13kHz の制御器である。

図 3.5.3.6 において、2 自由度制御系の特徴として、最終目標値への追従性はフィードバック系の制御器 C_m により改善され、最終目標値までの追従性については目標値フィルター C_r により改善され、 C_m と C_r とは独立に設定可能である。 C_r として、フィードバックループ系の閉ループ伝達関数になるように設計すると、理論的には目標値に完全追従する[26]。つまり、 C_r として式(3.5.3.2)のように設定すれば、R から Y への伝達関数は 1 となり、Y は目標値に完全に追従する。

$$C_r = \frac{1 + C_m P}{C_m P} \quad \dots\dots\dots (3.5.3.2)$$

しかしながら、現実のシステムにおいて、 $C_m P$ は完全なプロパーであることから、式(3.5.3.2)による制御器はプロパーなシステムにならず、図 3.5.3.7 に示すように、カットオフ周波数近傍より高い周波数にて微分項が含まれシステムが不安定になる恐れがある。

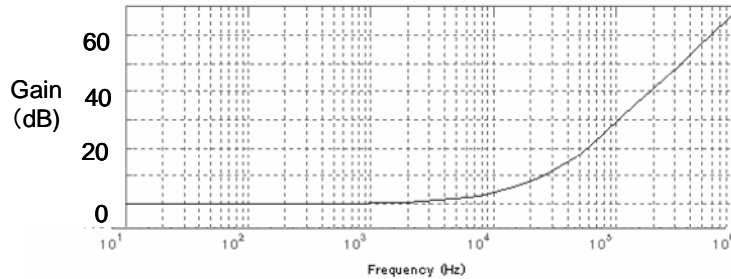


図3.5.3.7 C_r の周波数特性(シミュレーション)

そこで、サーボ帯域以下の適当な 1 次のローパスフィルターを入れて、次式のように設定すれば微分項の影響は除去することが可能である。

$$C_r = \frac{1}{1 + Ts} \cdot \frac{1 + C_m P}{C_m P} \quad \dots\dots\dots (3.5.3.3)$$

ところが、式(3.5.3.3)の制御器を実装するには、アクチュエーターP の伝達関数の正確なモデル化が必要である。また、制御器 C_m は、§ 3.4.3 で述べたように、位相進みフィルター、チャージポンプ(不完全積分)フィルターからなることから次数が 2 次であり、アクチュエーターの次数も § 3.4.1 で述べたように次数が 2 次である。従って、式(3.5.3.3)は 5 次系のシステムとなるが、FPGA のゲート数には限度がある。このため、式(3.5.3.3)のフィルターをアナログにしてもデジタルにしてもハードウェアを実装するのは困難である。ところが、サーボゲインが十分に取れている低域特性を考えると、式(3.5.3.4)のようである。

$$C_m P \gg 1 \quad \dots\dots\dots (3.5.3.4)$$

従って、式 (3.5.3.4) より、式(3.5.3.3)は次式のように特性近似が可能である。

$$C_r \approx \frac{1}{1 + Ts} \quad \dots\dots\dots (3.5.3.5)$$

式(3.5.3.3)で示される目標値フィルターであれば、アナログ、デジタル問わずハードウェア実装は可能である。そこで、本研究では、目標値フィルターとして、式(3.5.3.5)で示される 1 次ローパスフィルター型の制御器を導入し、実験的に当該制御器を最適化することにした。

その結果、目標値フィルターとして、式(3.5.3.6)で示されるフィルターが得られた。また、図 3.5.3.8 に、 $K_r=1$ とした場合のステップ応答 (シミュレーション) を示す。

$$C_r = \frac{K_r}{0.01s + 1} \quad \dots\dots\dots (3.5.3.6)$$

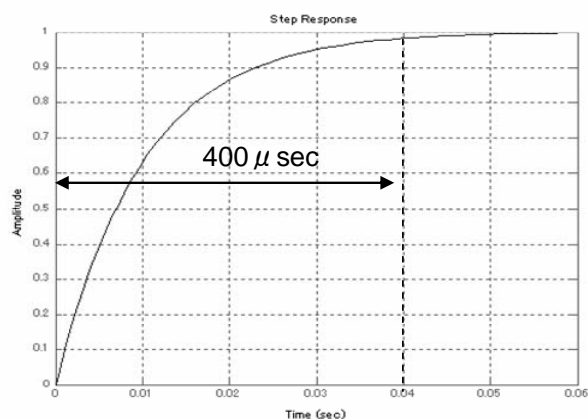


図3.5.3.8 目標値フィルターのステップ応答(シミュレーション)

なお、ゲインKは、図 3.5.3.1 に示す初期目標値である近接場状態検出電圧と最終目標値である目標ギャップ電圧値との差分電圧になるように調整される。なお、実験的に最適化して得られた式(3.5.3.6)の目標値フィルターの時定数は、VCM アクチュエーターの整定時間の 1/10 程度に相当していることがわかった。

以上、プルイン電圧として式(3.5.3.1)、目標値フィルターとして式(3.5.3.6)と設定し、RW ディスク基板に適用した結果を図 3.5.3.9 に示す。

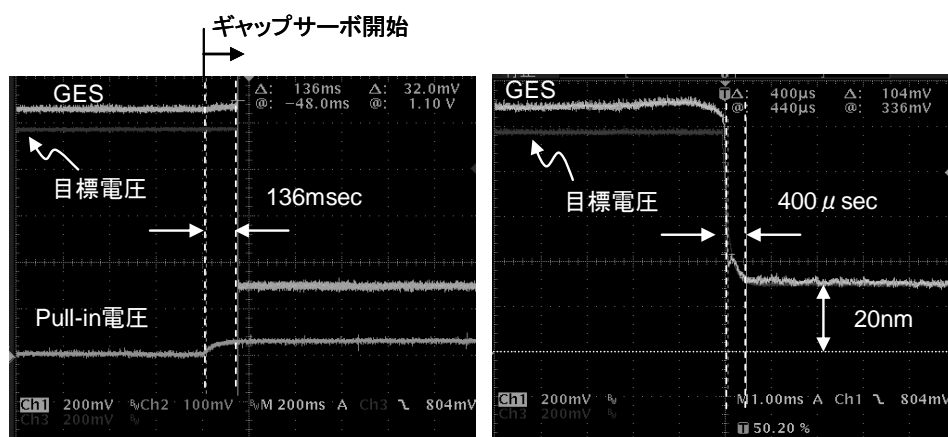


図3.5.3.9 改良型プルインの様子

図 3.5.3.9 より、プルイン時間は 136msec となり、§ 3.5.2 で述べたランプ入力型プルイン手法による 314msec から約 60%の短縮に成功した。また、ランプ入力型プルイン手法と異なり、目標値フィルターに完全追従することに成功し、その結果、オーバーシュートを完全に抑制することに成功していることが確認できた。つまり、改良型プルイン手法によれば、ランプ入力型プルイン手法での目標ギャップ長である 85nm よりもさらに短い 20nm の狭ギャップに対して、しかもランプ入力型プルイン手法よりも高速に、ナノメートルオーダーのオーバーシュートもなく安定して引き込むことに成功している。

なお、以上までの結果は、プルイン時にディスクが静止している場合であるが、ディスクが回転している状態でも、SIL がディスクに衝突することなく安定して引き込めることも確認した。図 3.5.3.10 に、3000rpm で回転数するポリカーボネイトディスクに 300 μ m の初期位置から 20nm のギャップに引き込む様子を示す。

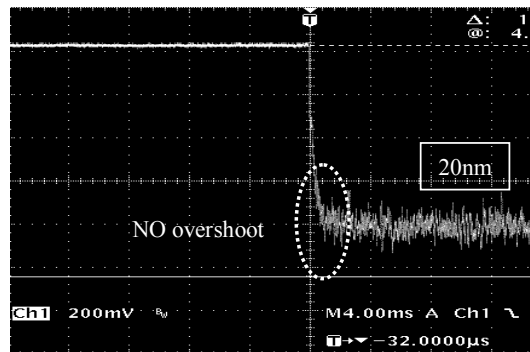


図3.5.3.10 3000rpm回転するディスクでのプルイン動作

図 3.5.3.10 に示すように、3000rpm で回転するディスクに対して、帯域 13kHz のサーボ及び 2 自由度サーボによるプルイン手法によりオーバーシュートを抑制し、SIL がディスクに衝突することなく引き込むことに成功している。

3.5.4 自動プルイン手法[16]

本節では、§ 3.5.2 で述べた手法と § 3.5.3 で述べた手法を組み合わせたプルイン手法について述べる。

§ 3.5.2 で述べた手法は、プルイン電圧としてランプ状電圧を用いているためギャップサーボ開始時において速度外乱を引き起こすという問題があるものの、ディスクと SIL の初期位置が設定値よりもずれている、もしくは不定であっても自動的に近接場状態を検出できるという利点がある。一方、§ 3.5.3 で述べた手法は、ギャップサーボ開始時において速度外乱という問題はないもの、規定のディスクと SIL の初期位置で決まる電圧値で固定されているため、ディスクをスピンドルモーターにクランプした際に生じるディスク歪みによっては電圧値がずれてしまい調整する必要が生じる可能性がある。そこで、SIL がどのような初期位置にあっても自動的に近接場状態を検出し、かつ安定して近接場状態に引き込める自動引き込みシステムを検討した。

本手法による引き込みの様子を図 3.5.4.1 に示す。

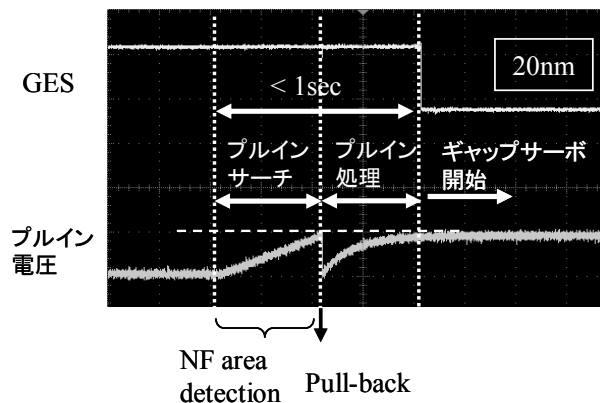


図3.5.4.1 自動プルインシステム

本手法では、近接場状態を検出する“プルインサーチ”とその結果に基づいてプルインを行う「プルイン動作」の 2 段階からなる。まず、“プルインサーチ”動作において、§ 3.5.2 でのプルイン手法のようにアクチュエーターにランプ電圧を印加する。そして、近接場状態が検出された時点で、プルイン電圧を記憶するとともに、アクチュエーターに印加する電圧をゼロにし、SIL をディスクから引き離す“プルバック動作”を行う。次に、先に保存したプルイン電圧を用いて、§ 3.5.3 で述

べた手法にて SIL を最終目標値である 20nm に引き込む。以上のようにすることで、SIL がどのような位置にあっても自動的に近接場状態に安定して引き込むことが可能となる。例として、異なる初期位置にある SIL に対して本手法を適用した様子を図 3.5.4.2 に示す。

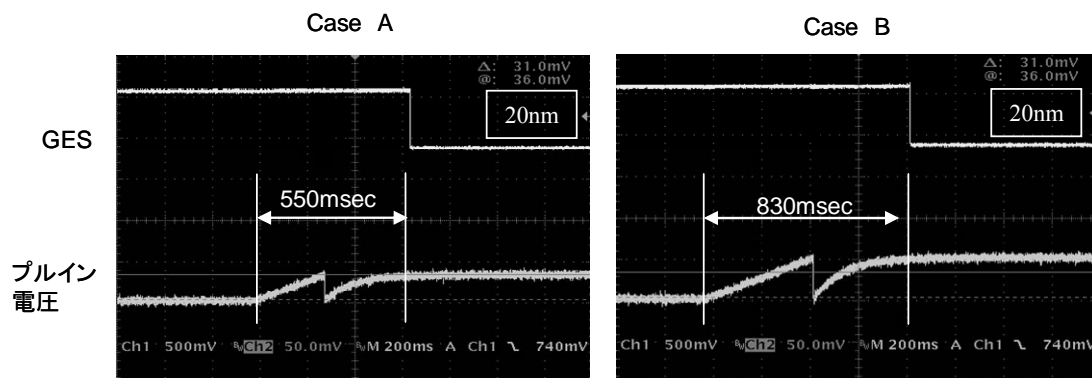


図3.5.4.2 自動プルインシステム

図 3.5.4.2 より、初期位置に応じたプルイン電圧を自動生成し、安定して近接場状態に引き込み、所望のギャップに維持することに成功している。また、本手法を、3000rpm で回転するポリカーボネイドディスクに適用した結果を図 3.5.4.3 に示す。

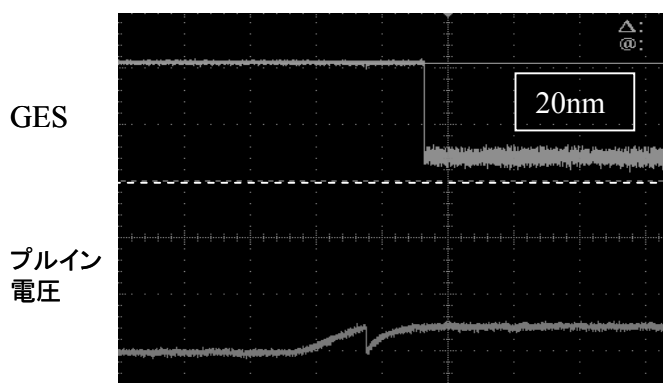


図3.5.4.3 自動プルイン動作(3000rpm)

図 3.5.4.3 に示すように、3000rpm で回転するディスクに対しても、帯域 13kHz の高帯域ギャップサーボと自動プルインシステムにより安定して近接場状態に引き込むことに成功しており、所望のギャップに維持することに成功している。

3.6 まとめ

本章では、近接場光ディスクシステムの実現の前提であるナノギャップ制御技術について述べた。

ナノギャップ制御技術とは、対物レンズである SIL とディスク間の距離を近接場光が発生する距離、つまり 25nm 程度に一定に保持するギャップサーボ技術と、ファーフィールド状態の位置にある SIL をディスクに衝突させることなく安定に近接場状態に位置に引き込むプルイン技術の 2 つからなる。

ギャップサーボ技術では、まず、ナノギャップを検出する手法として、円偏光入射検出方式による SIL 端面での全反射戻り光量にて検出する光学式ギャップエラーを導入した。次に、近接場光ディスクシステムにおけるギャップサーボ仕様を明らかにした。100Gbyte 容量で 100Mbps の転送レートを実現するためにディスク回転数は 3000rpm とした。また、ディスクのリムーバブル性を考慮して、当該回転数での許容ディスク面ぶれ量を 40 μ m とした。そして、再生系における RF 振動

振幅変動抑制の観点、記録系におけるレーザーパワー変動抑制の観点から残渣ギャップエラーを 5nmPP 以下とし、RF 信号の SNR の観点から目標ギャップ長を 25nm 程度とした。この仕様を満足させるためにリファレンスサーボを導入し、ギャップサーボとして必要とされる性能を明らかにした。そして、サーボ帯域が 13kHz の高帯域ギャップサーボ及び、ギャップエラーに重畳する回転同期成分を効果的に抑制する繰り返しサーボによる学習サーボを導入し、これらを組み合わせるハイブリッドサーボにより最終的に仕様を満足させた。その結果、ディスク面ぶれ 40 μ m を許容し、3000rpm で回転するディスクに対して、5nm 精度で 20nm または 25nm のギャップを安定に保持することに成功した。なお、世界最高レベルのサーボ帯域の 13kHz 化においては、連続系サーボフィルターを離散化しハードウェア実装化する際に、フィルター係数を予めビットシフト表現し、フィルターを最適化した後で固定小数点演算課することで、実装前後のフィルター性能を保証するように工夫した。この他、高域改善フィルターの追加、高次メカ共振の抑制フィルターの追加、高速の AD 及び DA 変換素子によるサンプリング周波数 350kHz 化を行うことで達成に成功した。

一方、プルイン技術では、ディスクから 300 μ m 離れた位置にある SIL を近接場状態に安定に引き込むためのプルインシステムを開発した。

まず、ランプ型プルイン手法を導入し、314msec で SIL をディスクに衝突させることなく安定に引き込むことに成功した。次に、ランプ型プルイン手法を改善した 2 自由度制御系によるプルイン手法を導入することで、近接場引き込み時の SIL の速度外乱を抑制が可能とした。その結果、ディスクの回転を問わず、ディスクに衝突させることなく、136msec で高速に引き込むことに成功した。また、これら 2 種類のプルイン手法を組み合わせることで、自動的に SIL のディスクからの距離を検出し、ディスクに衝突させることなく安定に引き込むことにも成功した。

参考文献

- [1] 大津元一、河田 聡、“近接場ナノフォトニクス入門”、オプトロニクス社 (2000)、pp.7-8
- [2] T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "High-transfer-rate near-field writable system for a polycarbonate disc", Proc. SPIE, 5380, pp. 23-242 (2004)
- [3] 中島平太郎、小川博司、“コンパクトディスク読本”、オーム社 (1988)、pp.165-166
- [4] 水野 剛、一杉 太郎、小島 直人、山崎 茂、酒匂 景康、渡辺 健次郎、“近接場光記録システム用光浮上ヘッド”、信学技報 CPM2001-74、pp.19-24 (2001)
- [5] M.Hirata, M.Oumi, and K.Nakajima,"Signal read-out using near-field optical flying head with a protruded aperture", Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory, pp. 38-39 (2004)
- [6] I.Ichimura, K.Kishima, K.Osato, K.Yamamoto, Y.Kuroda, and K.Saito, "Near-Field Phase-Change Optical Recording of 1.36 Numerical Aperture", Jpn. J. Appl. Phys., **39**, No.2B, pp.962-967 (2000)
- [7] T.Ishimoto, K. Saito, T.Kondo, A.Nakaoki and M.Yamamoto,"Near field readout system for a high density optical ROM disc", Proc. SPIE, **4342**, pp. 294-303(2001)
- [8] K.Saito, T.Ishimoto, T.Kondo, A.Nakaoki, S.Masuhara,M.Furuki and M.Yamamoto,"Readout Method for Read Only Memory Signal and Air Gap Control Signal in a Near Field Optical Disc System ", Jpn. J. Appl. Phys. **41**, No.3B, pp. 1898-1902 (2002)
- [9] 尾上守夫監修、“光ディスク技術”、ラジオ技術社 (1988)、pp. 66-68
- [10] 左貝潤一、“光学の基礎”、コロナ社 (1997)、pp. 149-151
- [11] T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto, “Gap Servo System for a Biaxial Device Using an Optical Gap Signal in a Near Field Readout System”, Jpn. J. Appl. Phys. 42, Part 1, No.5A, pp. 2719-2724 (2003)
- [12] 中島平太郎、小川博司、“コンパクトディスク読本”、オーム社 (1988)、pp.20-22
- [13] A. Nakaoki, M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Horigome, K. Takagi and M. Yamamoto, “Over 100GB Optical Phase-Change Disc System Realized by Near-Field Technology”, European Symposium Phase Change and Ovonic Science, 24 (2005)
- [14] I.Ichimura, K.Kishima, K.Saito, K.Yamamoto, Y.Kuroda, A.Iida, S.Masuhara, and K.Osato,"Near-Field Optical Recording on Pre-Grooved Phase-Change Disk in the Blu-Violet", Jpn. J. Appl. Phys., **40**, No.3B, pp.1821-1826 (2001)
- [15] B.D.Terris, H.J.Mamin, and D.Rugar, “Near-field optical data storage”, Appl. Phys.Lett. , **68**, No.2, pp141-143 (1996)
- [16] T. Ishimoto, T. Matsui, S. Kim, K. Saito, K. Takagi, S. Haga, A. Nakaoki and M. Yamamoto, “Technologies for Removability in a Near-Field Optical Disc System”, Proc. SPIE, 6282 C1-C10 (2006)
- [17] G.Begtsson, “Output Regulation and Internal Models – a Frequency Approach”, Automatica, **13**, pp. 333-345 (1975)
- [18] 原 辰次、“繰り返し制御”、計測と制御、Vol.25, No.12, pp.51-59 (1986)
- [19] 浜田 望、松本直樹、高橋 徹、“現代制御理論入門”、コロナ社 (1997)、pp. 222-224
- [20] 中野道雄、井上 恵、山本 裕、原 辰次、“繰り返し制御”、コロナ社 (1988)、pp.48-51
- [21] 山口高司、穴田和久、平井洋武、“磁気ディスク装置ヘッド位置決めサーボ系におけるサーボモード切り替え時の初期値補償問題の基礎検討”、計測自動制御学会論文集、vol.29, No.7,

pp.792-799 (1993)

- [22] 市村 功、木島公一、“光学系の位置決め装置と位置決め方法ならびに記録再生装置”、特許公開番号 2001-23182
- [23] T. Ishimoto, K. Saito, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Near field readout system for a high density optical ROM disc", Proc. SPIE, 4342, pp. 294-303(2001)
- [24] T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Gap Servo System for a Biaxial Device Using an Optical Gap Signal in a Near Field Readout System", Jpn. J. Appl. Phys. 42, Part 1, No.5A, pp. 2719-2724 (2003)
- [25] 須田信英、“PID 制御”、システム制御情報学会 (1992)、pp.75
- [26] 杉江 弘、“入門 MATLAB/Simulink による制御系設計手法”、トリケップス (2003)、pp.86-87

第4章 チルトサーボ技術

4.1 はじめに

光ディスクシステムでは、対物レンズとディスク間の距離が一定に保持され、ディスク面にフォーカスされた円形のレーザスポットにより記録再生が行われる。しかしながら、光スポットを形成する光軸がディスクに対して傾いている場合はコマ収差が生じ、光スポットが楕円形に歪す。その結果、同一トラック上の隣接するピットまたはマークや、隣接するトラック上のピットまたはマークに光スポットがかかり、符号間干渉やクロストークが生じて信号品質が劣化してしまう。このため、例えば、Blu-ray ディスクでは、この光学的な要因による信号劣化を防ぐために、レンズとディスク間の傾き（スキュー）のマージンを約 1.0degPP と制限している。

一方、近接場光ディスクシステムでは、固体浸レンズ(Solid Immersion Lens; SIL)レンズとディスク間のギャップが 25nm 程度とハードディスクドライブに近く、スキューにより信号劣化する前に、メカニカルな要因で SIL とディスク間が衝突する恐れがある。近接場光ディスクシステムの実現の前提であるギャップサーボの安定動作のためには、SIL とディスク間がチルトにより衝突しないことが不可欠である。

本章では、近接場光ディスクシステムにおけるチルト問題について検討する。まず、SIL とディスク間の初期のチルトについて検討し、次に、ナノギャップ間のチルトの計測手法を提案する。その計測手法に基づき、近接場光ディスクにおけるチルト量を評価する。また、検出されたチルト量を利用したチルトサーボについて検討し、ディスク全面でのナノギャップ安定性を実証する。また、チルトエラー信号に基づいてギャップサーボを高精度化する手法を示し、その有効性を実証する。

4.2 初期チルト補正

4.2.1 メカニカルチルトマージン

本研究で用いている光ピックアップ部を図 4.2.1.1 に示す。図 4.2.1.1 に示すように、本研究では、超半球型の SIL を用いており、また、第 6 章に述べるように、SIL 先端部に生じるエアフローの観点から、SIL 先端部はコンカル型形状となっている。また、SIL とディスク間のギャップは、§ 3.3.2 に述べているように 25nm 程度である。SIL がディスクにチルトより衝突する場合、図 4.2.2 のようになる。

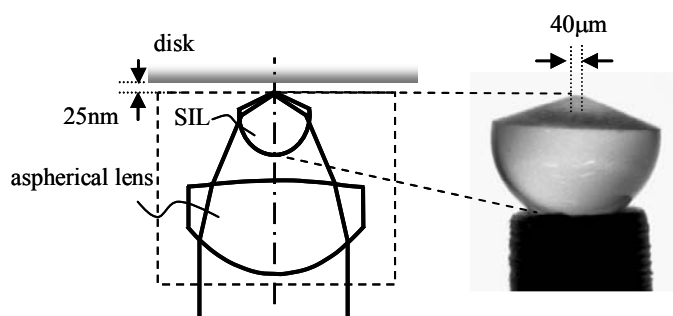


図4.2.1.1 ニアフィールド光ディスク装置の光ピックアップ

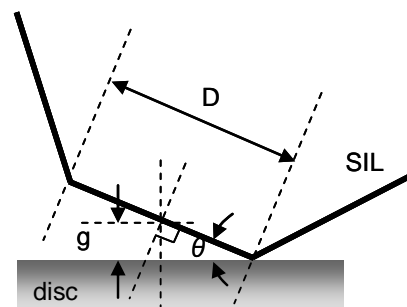


図4.2.1.2 SILとディスク間のチルト角

従って、図 4.2.1.2 より、ギャップを 25nm とすると、メカニカルチルトマージン T_m は、次式のようになる。

$$T_m = \pm \sin^{-1} \frac{2g}{D} = \pm 0.07(\text{deg}) \quad \dots\dots\dots (4.2.2.1)$$

つまり、SIL とディスク間のチルトが $\pm 0.07(\text{deg})$ 以下でないと、メカニカルな要因でSIL とディスク間が接触することになる。以下、本章においては、ギャップを 25nm として論じる。

図 4.2.1.3 は、タンジェンシャル、ラジアルチルト角度に対するジッターの影響を調べたものである。

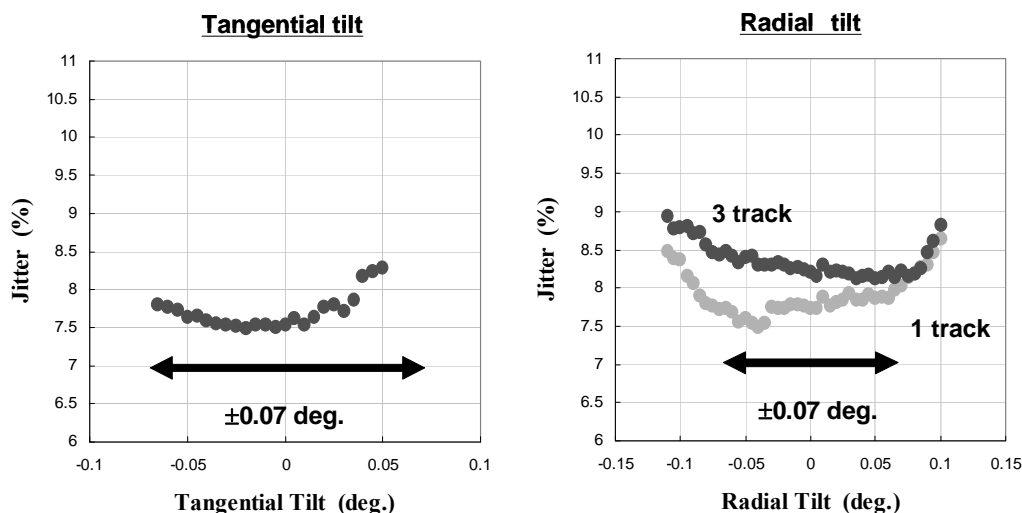


図4.2.1.3 チルト角とジッターの関係 (55 nm/bit, 160 nm/tp)

図 4.2.1.3 より、メカニカルチルトマージン内である $\pm 0.07\text{deg}$ 以内であれば、ほぼジッターは一定であり、信号品質には影響を与えないことがわかる。つまり、近接場光ディスクでは、光学的な要因よりも物理的にSIL がディスクに衝突する場合は支配的要因となっている。従って、近接場光ディスクにおいて、安定した記録再生をディスク全面で行うためには、チルトを $\pm 0.07\text{deg}$ 以下に抑制することが求められる。

4.2.2 初期チルト問題

SIL とディスク間のチルトをマージン内に抑制するにあたり、SIL とディスクとの初期チルトを補正することが非常に重要である。初期チルトとは、ディスクをスピンドルモーターにクランプし、SIL をディスクに静止状態にて接触させたときに存在するチルトのことである。初期チルトが発生する要因としては、以下の要因が考えられる。これらが存在すると容易にチルトマージンを超えてしまう。

- ① SIL をレンズアクチュエーターに組み込む時に生じるチルト
- ② レンズアクチュエーターを近接場光ディスクシステムに設置したときに生じるチルト
- ③ スピンドルモーターの回転中心軸と光軸とのチルト
- ④ スピンドルモータークランプ面の振れに起因するチルト
- ⑤ クランプ面に存在するダストに起因するチルト
- ⑥ ディスク変形によるチルト

①～③については、ディスクに依存しない静的なチルトであり、本節に述べる初期チルト調整にて除去する。④については、第 5 章で述べるように、クランプ面の振れを $1\mu\text{m}$ 以下に抑制し、かつスピンドルモーター自身の振れである繰り返し性のある振れ (Repetitive Run-Out; RRO) や非繰り返し性の振れ (Non-Repetitive Run-Out ;NRRO) も $0.1\mu\text{m}$ 以下に厳しく規定されたスピンドルモーターを開発することで影響を軽減している。なお、その他の⑤、⑥については、ディスク依

存であり、またディスク回転により動的に変化する。そこで、④も含めて⑤、⑥に対しては本章で述べるチルトサーボにより抑制する。

図 4.2.2.1 に初期チルトがある場合において、SIL をディスク表面へとの接触させたときの全反射戻り光量への影響を示す。

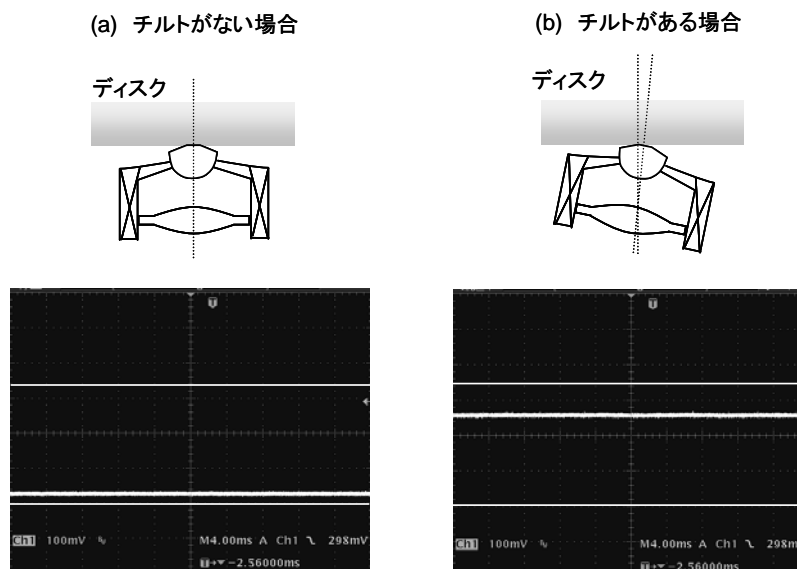


図4.2.2.1 初期チルトがある場合の接触レベルに対する影響

図 4.2.2.1(a)は、初期チルトがない場合の全反射戻り光量を示したものである。接触時において、SIL とディスク間にはチルトがないため、SIL はディスクと完全に接触する。この結果、近接場光は全てディスク側に透過し、全反射戻り光量としてはゼロとなる。一方、図 4.2.2.1(b)は、初期チルトがある場合の全反射戻り光量を示したものである。接触時において、SIL はディスクに対して図 4.2.2.1(b)に示すように SIL のエッジで片当たりする状態となるため、SIL とディスク間にチルトが生じて SIL はディスクと完全に接触せず、近接場光の一部はディスク側に透過しないため全反射戻り光量はゼロとならない。この結果、初期チルトの有無により図 4.2.2.2 のような全反射戻り光量特性の違いが生じる。

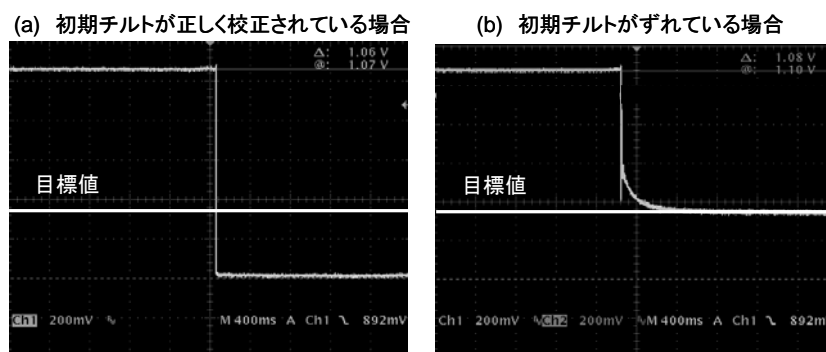


図4.2.2.2 ギャップエラー特性に対する初期チルトの影響

つまり、初期チルトがない場合は、図 4.2.2.2(a)のようにファーフールド状態では全反射戻り光量は一定で、近接場における接触状態ではゼロとなる。本研究においては、ファーフイル状態が全反射戻り光量一定である状態を規格化して 1.0(V)とし、接触状態を 0(V)になるようにしている。そこで、以下、図 42.2.2(a)のようなギャップエラー特性を“1-0 特性”と呼ぶことにする。一方、初

期チルトがある場合は、図 4.2.2.2(b)のようになる。図 4.2.2.2(b)は、故意に初期チルトとしてメカニカルチルトマージン以上である 1.5mrad (8.6mdeg) を重畳させた場合であり、接触状態において全反射戻り光量がゼロにならず、正しい“1-0 特性”が得られない。これは接触時において、SIL が片当たりして、プルイン電圧により押しつけられている状態を示している。図 4.2.2.2(b)に示すように正しい“1-0 特性”が得られないとギャップサーボを動作させるのは難しい。例えば、図 4.2.2.2(b)のような場合、目標値が接触レベルとなっているため、ギャップサーボをかけるのはもはや困難となる。また、SIL に初期チルトがある場合、ギャップサーボの周波数特性にも影響を及ぼす。図 4.2.2.3(a)は初期チルトがなく、正しい“1-0 特性”が得られている場合で、この場合はギャップサーボの周波数特性も適切に得られる。しかし、初期チルトがあり、図 4.2.2.3(b)のように正しい「1-0」特性が得られない場合、ギャップサーボ特性に複数のメカニカル共振が重畳した状態となる。これは、目標値と接触レベルが近接しているため、ギャップに摂動が加わると、SIL 端面とディスクが容易に接触し、SIL とディスク間で共振してしまうからだと考えられる。図 4.2.2.3(b)のような周波数特性であると安定したギャップサーボは不可能となる。

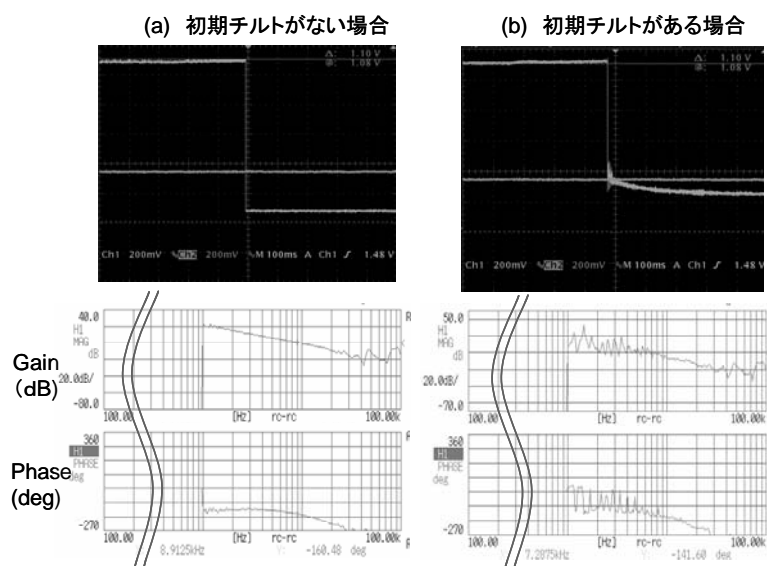


図4.2.2.3 初期チルトがずれている場合の周波数特性

4.2.3 初期チルト調整[1]

初期チルト調整手法を図 4.2.3.1 に示す。レンズアクチュエーターは、ラジアル（ディスクの半径方向）、あるいはタンジェンシャル（ディスク上の周内レンズ移動方向）に移動させる初期チルト補正機構に設置されている。それぞれのチルト補正機構において、移動角度は $\pm 8\text{deg}$ で、ともにステッピングモーターによるマイクロステップ駆動が可能であり、ステップ角はタンジェンシャル、ラジアル方向共に 0.001488deg となっている。また、SIL の先端中心としてチルト移動するよう設計されている。

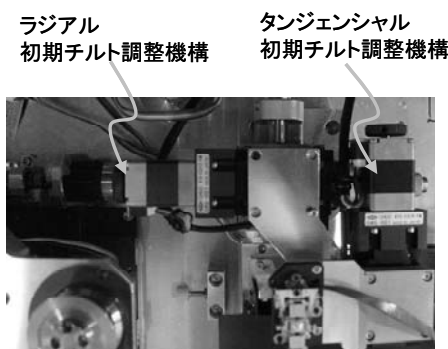


図4.2.3.1 初期チルト調整機構

初期チルト調整方法は、近接場光ディスクシステムにVCMアクチュエーターを初めて設置するときに行う。初期調整では、第3章§3.5.3で述べたプルイン電圧をVCMアクチュエーターに印加し、SIL端面をディスク表面に接触させる。そして、プルイン電圧印加前後で、図4.2.3.3(a)の“1-0”特性が得られるように、タンジェンシャル、ラジアルの両軸を調整する。チルトがある場合は図4.2.3.3(b)に示すように、SIL端面がディスク表面に接触した際にSILとディスク間のギャップが完全にゼロとならないため、接触時の全反射戻り光量にオフセットが重畳する。逆に、初期チルトが完全に除去されている場合は、図4.2.3.3(a)に示すように、SIL端面がディスク表面に接触した際にSILとディスク間のギャップが完全にゼロとなるため、全反射戻り光量はゼロとなる。

チルト調整時においては、プルイン電圧を印加した状態で調整することが重要である。図4.2.3.2は、ギャップサーボ開始前の初期位置にてSILとディスク間のチルトを調整した場合を示す。ギャップサーボ開始前は、SILはディスクから $300\mu\text{m}$ 離れた位置に設置されていることから、この手法では、ディスク位置を $300\mu\text{m}$ 下げてSIL端面をディスク表面に接触させて初期チルトを除去する。その後、ディスクを $300\mu\text{m}$ 上昇させる。しかしながら、この手法では、SILの初期位置においては、図4.2.3.2(a)のようにSIL端面とディスクとのチルトはないが、プルイン電圧を印加してSILを初期位置から $300\mu\text{m}$ 上昇させると、図4.2.3.2(b)に示すように近接場状態においてチルトが生じてしまう。これは、SILを $300\mu\text{m}$ 持ち上げることにより、SILの自重によりSILが傾いてしまうダイナミックスキューが原因である。この問題を避けるためには、図4.2.3.3に示すように、プルイン電圧を印加した状態で初期チルトを調整する必要がある。このようにすれば、初期位置では図4.2.3.3(a)に示すようにSILとディスク間にチルトがあるが、近接場状態においては初期チルトが完全に除去される。

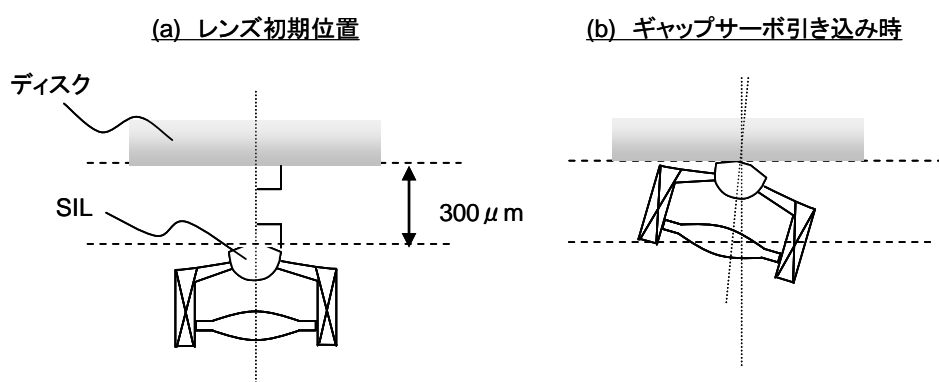


図4.2.3.2 アクチュエーターのダイナミックスキューの影響

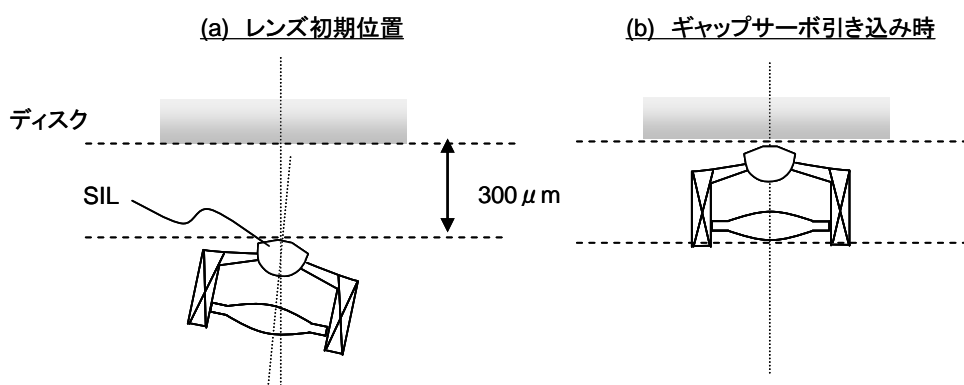


図4.2.3.3 引き込み位置で初期チルト調整した場合

以上の初期チルト調整により初期チルトは解消され、正しい“1-0 特性”が得られ、第3章で述べたギャップサーボ技術により所望のギャップに安定して引き込むことが可能となる。

4.3 チルト量評価[2]

4.3.1 ナノギャップチルト量検出手法[3]

初期チルトがない状態でギャップサーボを行ったとしても、§4.2.2で述べた④～⑥の影響でディスクを回転させた場合に生じる動的なチルトの影響を評価する必要がある。このため、ギャップサーボを行った状態で、SILとディスク間のチルトを計測する必要がある。チルトを計測する手法としては、チルトセンサーを組み込む手法[4]、RF信号、トラッキングエラー信号から計測する手法[5]があるが、いずれの手法においても対物レンズとディスクのギャップが数 $100\mu\text{m}$ 以上離れており、物理的にギャップ間にセンサーを設置できるか、チルトにより物理的にレンズがディスクに衝突しないことが前提となっている。しかしながら、近接場光ディスクシステムでは、SILとディスク間のギャップが 25nm 程度であり、チルトセンサーなどの外部センサーを組み込んで計測することは極めて困難である。また、RF、トラッキング信号の再生以前に、物理的な要因でのチルトが支配的となるため、これらの信号によりチルトを検出するのも困難である。

そこで、ギャップエラー信号より光学的にチルトエラーを検出する光学式ナノギャップチルトエラー検出手法を導入する。図4.3.1.1に原理図を示す。

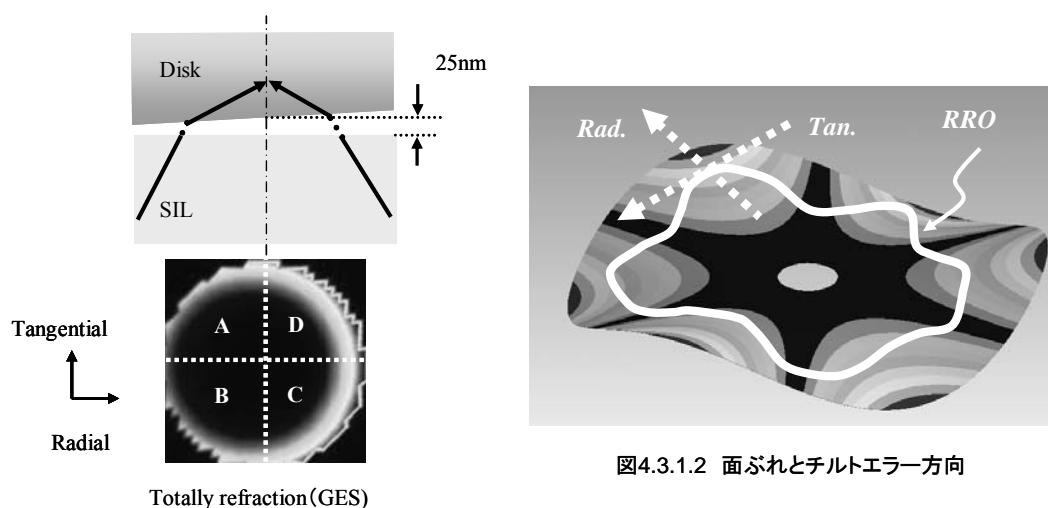


図4.3.1.2 面ぶれとチルトエラー方向

図4.3.1.1 光学式ナノギャップチルトエラー検出手法

本手法では、ディスク最表面に対してデフォーカスした状態でレーザーを照射する。そして、デフォーカス入射時のSIL端面における全反射戻り光量を4分割フォトディテクタで受光する。SILがディスクに対してチルトしている場合、図4.3.1.1に示すように全反射戻り光量のビームプロファイルを観察するとチルトに応じたビームの偏りが生じる。つまり、SIL端面において、チルトによりSILとディスク間がより接近する部分は全反射戻り光量が小さくなり、SILとディスク間がより離れる部分は全反射戻り光量が大きくなる。図4.3.2に示すように、面ぶれ信号に対して円周方向のチルトであるタンジェンシャルチルト、半径方向のチルトであるラジアルチルトを規定すると、ギャップエラー信号のタンジェンシャル方向、ラジアル方向のプッシュプル信号を得ることで、チルト量に応じた信号を生成することができる。タンジェンシャル方向のチルトエラー、ラジアル方向のチルトエラーをそれぞれTangential Tilt Error Signal (TTES)、Radial Tilt Error Signal (RTES)と呼ぶことにすると、次式のようになる。

$$TTES = (A + D) - (B + C) \dots\dots\dots (4.3.1.1)$$

$$RTES = (A + B) - (C + D) \dots\dots\dots (4.3.1.2)$$

また、全反射戻り光量（Totally Refraction; TR）は以下のようになる。

$$TR = A + B + C + D \dots\dots\dots (4.3.1.3)$$

となる。

なお、全反射戻り光量は原理的にはギャップエラー（Gap Error Signal; GES）と等価であることから、以下、GES と呼ぶことにする。

このように、GES により演算して、TTES、RTES を得ることで、外部のチルトセンサーを追加することなく、直接的にナノギャップ間のチルトを検出することが可能である。図 4.3.3.1 に、本手法により検出されたチルトエラー信号例を示す。

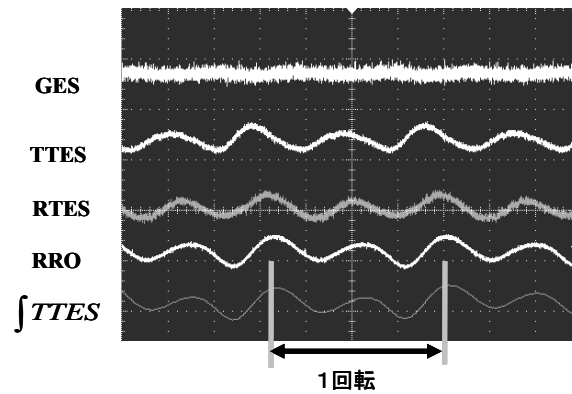


図4.3.3 光学式チルトエラー検出結果
(ディスク回転数400rpm; ディスク面ぶれ量 = 30 μ m)

ディスク面ぶれ量(Repetitive Run-Out; RRO)の接線方向の傾きがTTESに相当することから、TTESの積分値はRROと理論的に合致する。図4.3.3.1より、RROとTTESの積分値が合致しており、本方式によるチルト検出が正しく行われていることが確認できる。

4.3.2 光学式ナノギャップチルト信号の特徴

光学式ナノギャップチルト信号は、ギャップエラー信号のプッシュプル演算により生成されることから、ギャップ追従性が悪化して、ギャップエラーが悪化した場合の影響が懸念される。例として、面ぶれ量が46 μ mの場合に、ディスク回転数を1200rpm、2000rpmとした場合の信号の様子を図4.3.2.1に示す。

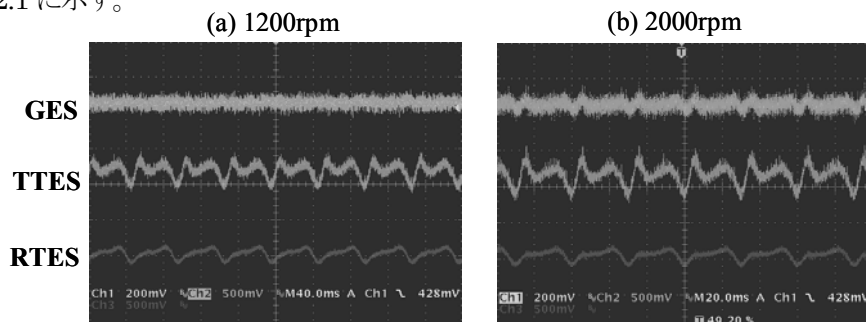


図4.3.2.1 光学式ナノギャップチルト信号のギャップエラー信号依存性
(ディスク面ぶれ量 46 μ m)

ディスク回転数が 1200rpm の場合 (図 4.3.2.1(a)) は、帯域 13kHz の高帯域ギャップサーボにより面ぶれに対する追従性は良好であるが、2000rpm の場合 (図 4.4.2.1(b)) は、面ぶれに対する追従性が悪化し、ディスク回転数成分の取れ残りエラーが顕在化してくる。これに比例して、TTES の歪みが大きくなり、また信号振幅も増大している。一方、RTES については、信号振幅の変化はみられないものの、信号の歪みが生じている。図 4.3.2.2 に、ディスク半径 30mm において、ディスク面ぶれを増大し、かつ、ディスク回転数を 400rpm、1200rpm、2000rpm、3000rpm と変化させた場合の GES、TTES、RTES について調べた結果を示す。

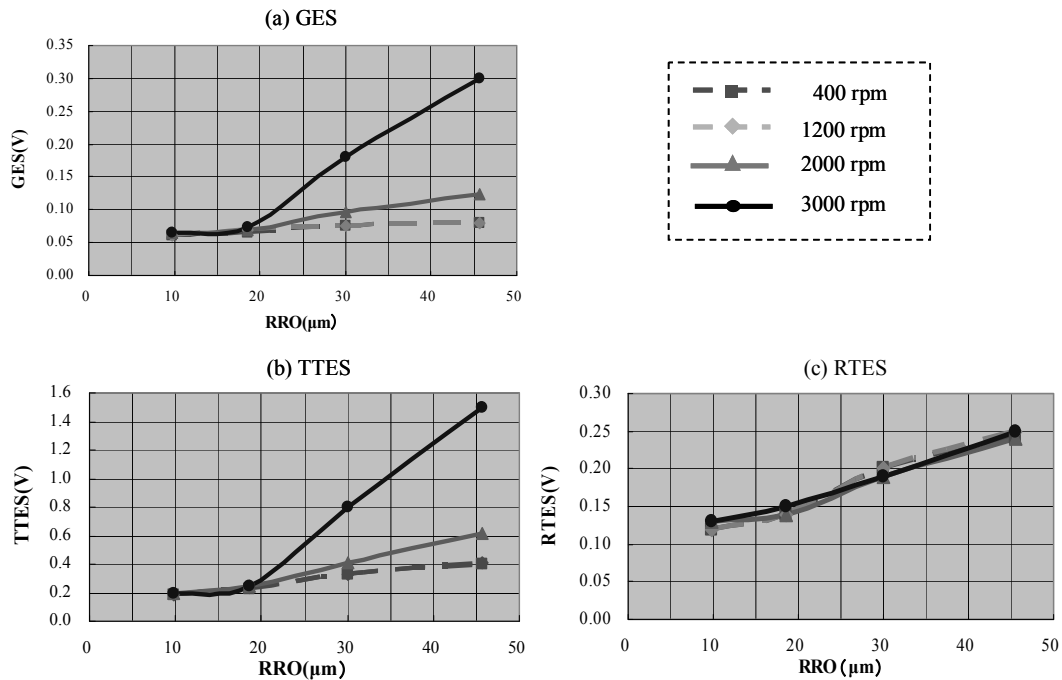


図4.3.2.2 ディスク面ぶれ量、ディスク回転数とGES、TTES、RTESの関係

図 4.3.2.2 より、面ぶれ量、ディスク回転数に依存して GES が悪化していることがわかる。これは、面ぶれ量が大きくなるほどギャップサーボシステムに対する外乱量が増えることに相当し、また、ディスク回転数が大きくなるほど、外乱の垂直加速度が増大し、ゲインが不足してくるためである。

一方、TTES は GES に比例して悪化することから、TTES は GES の影響を強く受け、GES に対して非ロバストであることがわかった。一方の RTES に対しては、GES が悪化しても面ぶれ量、回転数に対して変動せずにはほぼ一定であることから、RTES は GES の影響を受けにくく、GES に対してロバストであることがわかった。

チルトエラー信号としては、本来、ディスク回転数に依存すべきではないことから、光学式ギャップエラー信号、特に TTES は、チルトエラー信号としては不適切であり、このままでは正しいチルト量評価ができない。そこで、光学式チルトエラー信号のディスク回転数依存性を抑制する必要がある。この手法としては、次式のように GES により規格化する手法がある[3]。

$$TTES = \frac{(A + D) - (B + C)}{A + B + C + D} \quad \dots\dots\dots (4.3.2.1)$$

TTES については、GES と比例関係にあることから、式(4.3.2.1)に示す GES の規格化により TTES のディスク回転数依存性を回避することが可能である。この結果を図 4.3.2.3 に示す。

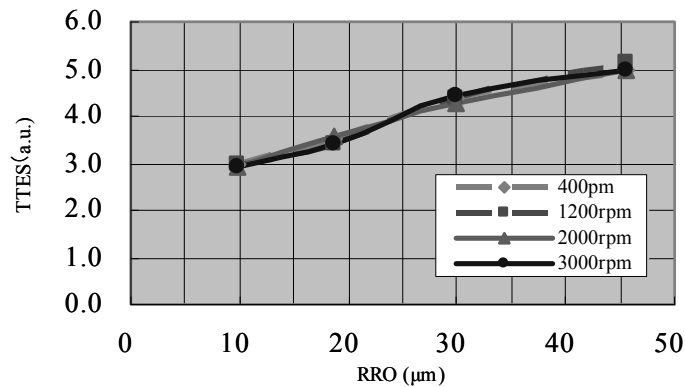


図4.3.2.3 規格化後のディスク面ぶれ量とタンジェンシャルチルトエラーの関係

この他、ギャップの追従性を高めることでディスク回転数依存性を回避するという手法も考えられる。この手法では、式(4.3.2.1)において分母、つまりGESを一定にすることで、TTESのディスク回転数依存性の抑圧を図る手法である。ギャップの追従性を高める手法としては、第3章 § 3.4.6 で述べたようにGES変動が回転同期であることに着目し、繰り返しサーボをギャップサーボに導入することが可能である。そこで、本実験において、繰り返しサーボを導入しGES変動の抑制を図った。図4.3.2.4に繰り返しサーボ適用前後の信号の様子を示す。

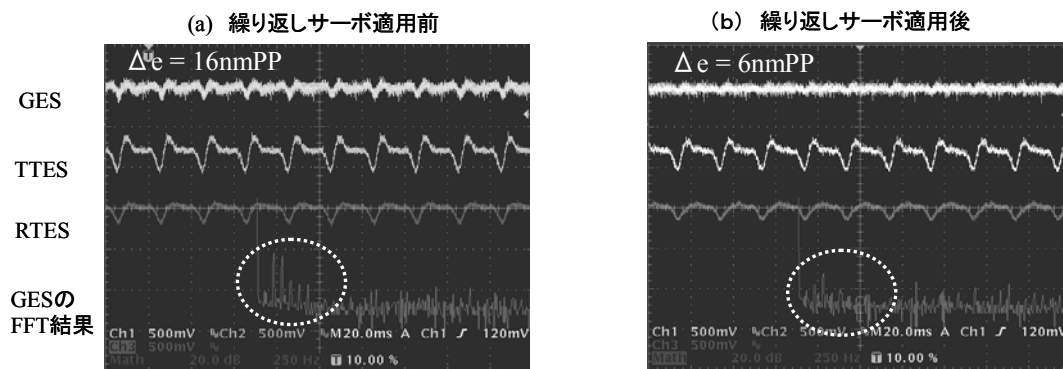


図4.3.2.4 ギャップ追従性向上後の光学式チルトエラー信号の改善

図4.3.2.4より、繰り返しサーボ導入により、繰り返し成分が十分に抑止され、残渣ギャップエラー16nmPPから6nmPPに改善している。また、GESのFFT結果から、回転同期の振動成分が十分に抑制されていることがわかる。GES品質の改善にともない、TTESの振幅、波形歪みが改善し、RTESについても波形歪みが改善されていることがわかる。図4.3.2.5に、繰り返しサーボを導入することで、ギャップサーボ追従性を改善した後のディスク面ぶれ量とTTESとの関係を示す。

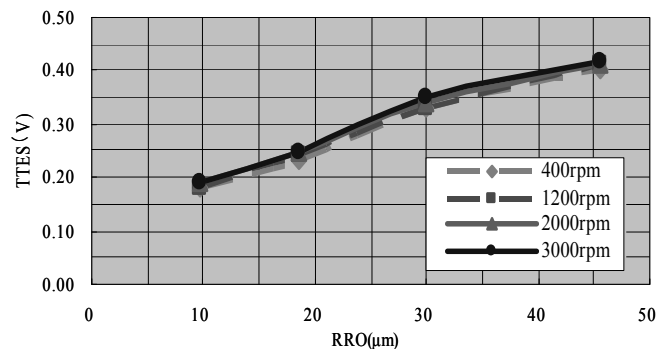


図4.3.2.5 ディスク面ぶれ量とタンジェンシャルチルトエラー電圧の関係
(繰り返しサーボによるGES変動抑制後)

図 4.3.2.5 より、ギャップ追従性を高める手法においても、GES による規格化の場合と同様に、ディスク回転数に対する依存性の抑圧が可能であることがわかる。

一方の RTES については、既にディスク回転数に対してロバストであり、ディスク回転数依存性がないため、TTES と異なり、検出された信号のままでチルトサーボ用のエラー信号として適用可能である。逆に、上述のように RTES はディスク回転数依存性がないため、GES で規格化してしまうと、サーボエラー信号として不適切になってしまう。一方の GES 変動抑制を抑圧する手法については適用しても特に問題はない。繰り返しサーボを適用した場合の RTES を図 4.3.2.6 に示す。

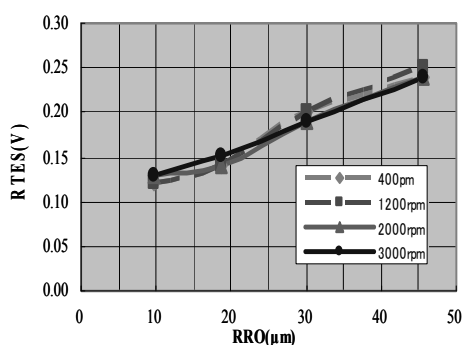


図4.3.2.6 ディスク面ぶれ量とラジアルチルトエラー電圧の関係
(繰り返しサーボによるGES変動抑制後)

RTES について図 4.3.2.6 と図 4.3.2.2(c)を比較すると、互いに等価であることがわかる。

以上のように、TTES のディスク回転数に対する依存性を抑圧する手法としては、GES により規格化する手法と GES 変動抑制を抑圧する手法の 2 つがあるが、前者の手法の場合、本質的には GES 変動は抑制されていないため、チルトサーボ適用後にギャップサーボ性能を向上させて GES 変動を抑制しない限り、安定した記録再生は不可能である。また、RTES に対して、GES により規格化すると、RTES は GES に対して依存性が小さいために不適切である。一方の後者の手法の場合は、GES 変動を抑制することが前提となっているため、GES 規格化による手法で起因する問題は生じない。そこで、チルトサーボを行うにあたり、GES 変動抑制を抑圧する手法に得られた TTES、RTES にて、チルトサーボを行うことにした。

4.3.3 ナノギャップチルト量評価

前節で得られたディスク回転数の依存性を回避したチルトエラー信号によれば、近接場光ディスクシステムにおけるチルト量を評価することが可能である。タンジェンシャルチルトエラーについて図 4.3.2.3、ラジアルチルトエラーについて図 4.3.2.2(c)または図 4.3.2.6 を用いて評価する。なお、評価にはこれらの計測値の平均値を用いて行った。

チルトエラー量を評価するにあたり、TTES、RTES の電圧値をチルト角度に変換する必要がある。チルト角度を変化させたときの TTES、RTES とチルト角度の関係を図 4.3.3.1 に示す。

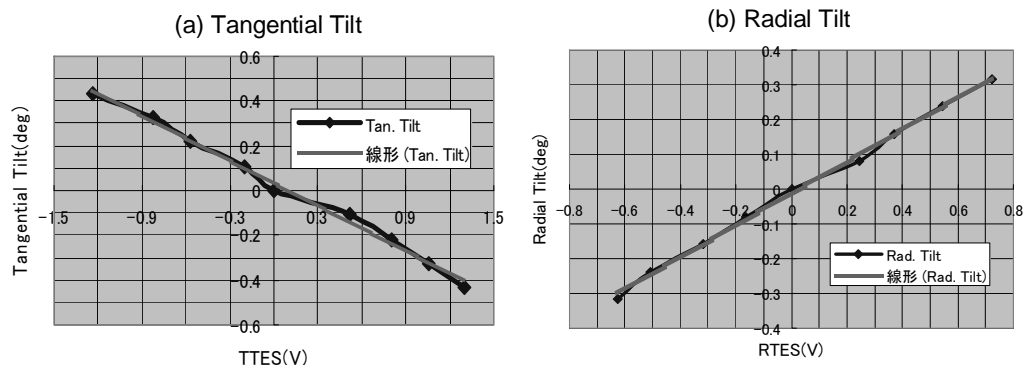


図4.3.3.1 チルト電圧と角度との関係

図 4.3.3.1 の関係から、TTES 電圧値 V_{\tan} 、RTES 電圧値 V_{rad} とタンジェンシャルチルト角 θ_{\tan} 、ラジアルチルト角 θ_{rad} の関係は次式のようにになる。

$$\theta_{\tan} = -0.33V_{\tan} \quad \dots\dots\dots (4.3.3.1)$$

$$\theta_{\text{rad}} = 0.45V_{\text{rad}} \quad \dots\dots\dots (4.3.2.2)$$

式(4.3.3.1)、式(4.3.32)の関係を用いて、タンジェンシャルチルトエラー、ラジアルチルトエラーの絶対振幅 (Peak to Peak; PP) 値を評価すると図 4.3.3.2 のようになる。

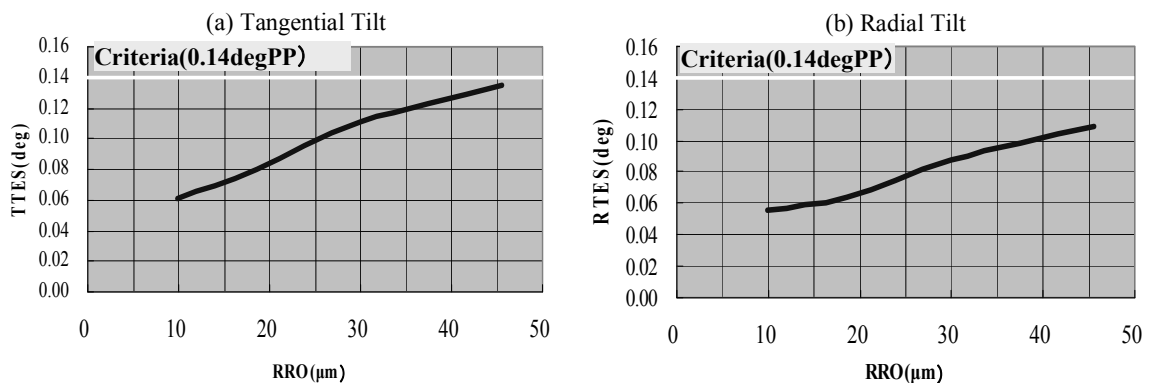


図4.3.3.2 チルト量の評価(R=30mm)

図 4.3.3.2 より、ディスク半径 30mm において、ディスク面ぶれ量が 50 μm 以下ならば、メカニカルチルトマージン内である $\pm 0.07\text{degPP}$ つまり 0.14degPP 以内であることがわかる。これは、我々の従来の実験条件であるディスク面ぶれ量 40 μm 以下のシステムにおいて、チルトサーボを行わなくてもギャップサーボが安定し、近接場動作をしている結果 [6][7][8] と合致する。

次に、半径とチルト量の関係について、半径 $R=30\text{mm}$ において、ディスク面ぶれ量 50 μm となる条件にて調べた。まず、チルト量の AC 変動成分の振幅 PP 値について調べた結果を図 4.3.3.3 に示す。

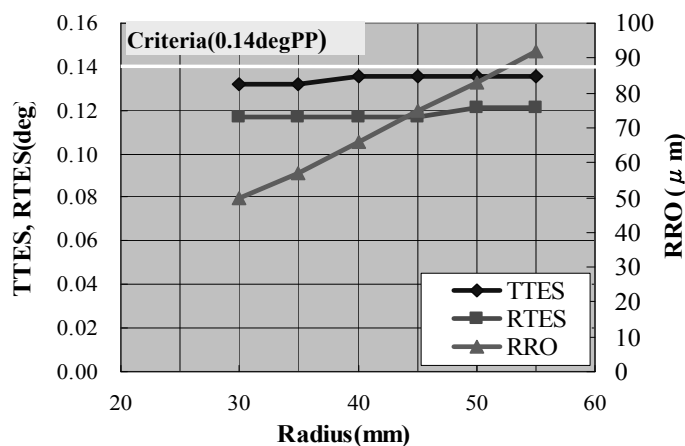


図4.3.3.3 半径とチルト量の関係(AC成分)

図 4.3.3.3 において、ディスク面ぶれ量は、理論通りに半径に応じたレバー比にて増大して半径と比例関係にあることがわかる。一方、TTES、RTES は半径に依存せず一定であることがわかった。前述したように、ギャップ性能を改善することで TTES、RTES のディスク回転数依存性は回避できる。そこで、以下の考察では、特に断らない限り、ディスク回転数を 400rpm とする。

図 4.3.3.4 に、半径 30mm と 55mm の場合の GES、及び TTES、RTES (AC 変動成分) の信号の様子を示す。図 4.3.3.4 に示すように、TTES、RTES はディスクの内周、外周において信号波形は異なるが、振幅 PP 値は不変であることがわかる。つまり、チルト AC 成分の PP 値は半径に依存せず一定であることがわかる。

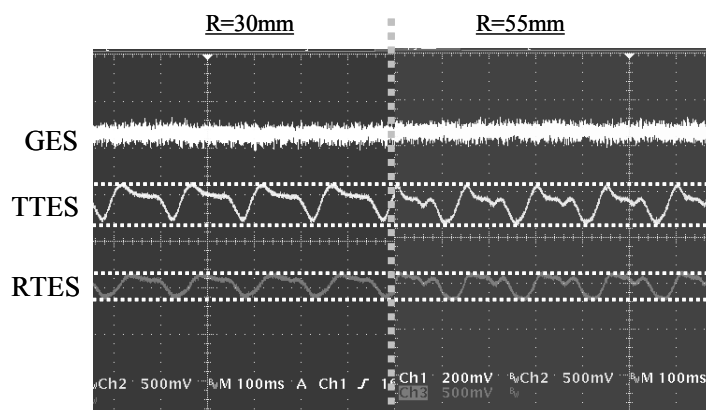


図4.3.3.4 半径差による信号比較(AC変動成分)

半径が長くなるとレバー比によりディスク面ぶれ量が大きくなりタンジェンシャルチルトは大きくなる。一方で、円周長も長くなるため、タンジェンシャルチルト量は小さくなる。このトレードオフの関係により、結果的にタンジェンシャルチルトの AC 変動成分の振幅 PP 値は半径に依存せずに一定になる。また、ラジアルチルトについては、AC 変動成分の振幅 PP 値は理論的にディスクとクランプ面のなす角度で一定であり、半径依存はないため、やはり一定となる。

一方、チルト量の DC 変動成分について調べると、図 4.3.3.5 のようになった。

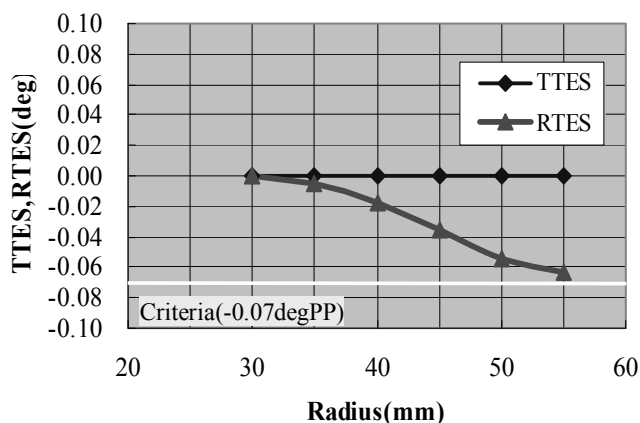


図4.3.3.5 半径とチルト量の関係(DC成分)

図 4.3.3.5 より、TTES の DC 成分は変動しないが、RTES の DC 成分は外周に行くほど増大し、最外周半径において、ラジアルチルトにより SIL がディスクに衝突する恐れがあることがわかる。図 4.3.3.6 に、半径 40mm と 55mm の場合の GES 及び、TTES、RTES の信号の様子を示す。これは、ディスクの傘チルトの影響である。傘チルトとは、ディスクをクランプしたときにディスクの自重により生じるチルトで、外周ほど大きくなり、理論的にラジアル方向に DC 変動成分として観察されるものである。この傘チルト量は、クランプ状態によるディスク面歪みの影響にも依存するので、クランプ依存するが、傘チルトの影響が強く観察された場合は、図 4.3.3.5 に示すようになる。

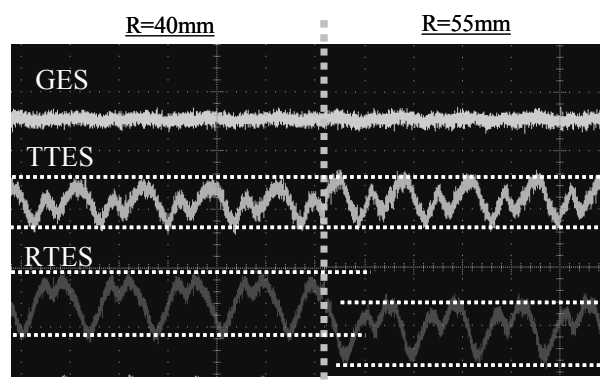


図4.3.3.6 半径差による信号比較(DC変動成分)

以上のことから、タンジェンシャルチルト、ラジアルチルト共に、半径に応じて AC 変動成分の振幅 PP 値は変化しないが、DC 変動成分については、タンジェンシャルチルトは半径依存しないもののラジアルチルトは半径に依存して DC 変動が生じることがわかった。このため、ディスク全面におけるナノギャップ安定性を考えると、ディスクの傘チルトの影響を考慮する必要があり、また、AC 変動成分が補正できれば、さらにナノギャップ安定性を増すことができることがわかった。

4.4 チルトサーボシステム仕様

本節では、前節までのチルトサーボ量評価結果に基づき、ディスク全面における近接場光による記録再生の実現のためのチルトサーボに対する仕様について考察する。近接場光ディスクシステムでは、§ 3.3.2 で述べたように 12cm ディスクサイズで 100Gbyte 以上、転送レート 100Mbps 以上の実現を目標としている。

第 3 章 § 3.3.2 表 3.3.2.1 で示したギャップサーボ仕様、§ 4.3 で述べたチルトエラー量の評価結果をもとに、Blu-ray 仕様を参考にして、ディスク全面で 100Gbyte 以上、100Mbps 以上を達成するためにの近接場光ディスクシステムの仕様を、以下のように決定した。

表4.4.1 近接場光ディスクシステム仕様

レーザー波長	405nm
開口率	1.84
回転方式	CLV ($v=7.536\text{m/s}$)
記録半径	24 ~ 58mm
ディスク回転数	3000rpm ~ 1240rpm
ディスク容量	> 100Gbyte
転送レート	> 100Mbps
面ぶれ量	<100 μ mPP
タンジェンシャルチルト (AC)	0.14degPP
ラジアルチルト (AC+DC)	0.3degPP

許容ディスク面ぶれ量は Blu-ray 仕様値の半分になっている。これに伴い、許容チルトマージンについても、Blu-ray 仕様値の 1/2 となっており、妥当である。

半径 24mm において、ディスク面ぶれ量 $40\mu\text{m}$ 、ディスク回転数 3000rpm と規定している。この場合、半径 30mm では面ぶれは $50\mu\text{m}$ となり、§ 4.3.3 で述べた実験条件と同じ条件となる。また、半径 58mm では面ぶれ量が $96\mu\text{m}$ となる。従って、ディスク全面を考えると、ディスク面ぶれ許容量として $100\mu\text{m}$ 程度と規定される。一方、チルトについては、§ 4.3.3 で述べた実験結果より、AC 変動成分においては、タンジェンシャルチルトの方が変動幅が大きい傾向があり、DC 変動成分においては、ラジアルチルトの方が顕著に生じる傾向がある。しかしながら、本実験におけるチルトサーボ設計時の仕様見積もりにおいては、タンジェンシャルチルト、ラジアルチルトを個別に見積もるのではなく、AC 成分、DC 成分の最悪値を採用して、タンジェンシャル、ラジアルを統一的に規定している。この場合、実際のシステムよりも厳しい仕様となるが、システムマージンの観点からは望ましいと考えられる。

以下、チルトサーボ仕様を決定していく。

まず、必要 DC ゲイン G_{DC} について見積もる。表 4.4.1 より許容チルト量を 0.3degPP であり、§ 4.2.1 よりメカニカルチルトマージン内にすることを制御目標とすると、以下ようになる。

$$G_{DC} = 20 \log \frac{0.3}{0.14} = 6.6 \text{ (dB)} \quad \dots\dots\dots (4.4.1)$$

実際のシステムを考慮すると、メカニカルチルトマージン内に十分に入る必要があることから、6.6(dB)は必要最低ゲインである。

次に、チルトサーボの必要帯域を見積もる。図 4.3.3.3 について、半径と面ぶれ量の関係、及び半径とディスク回転数の関係を示した図を図 4.4.1 に示す。

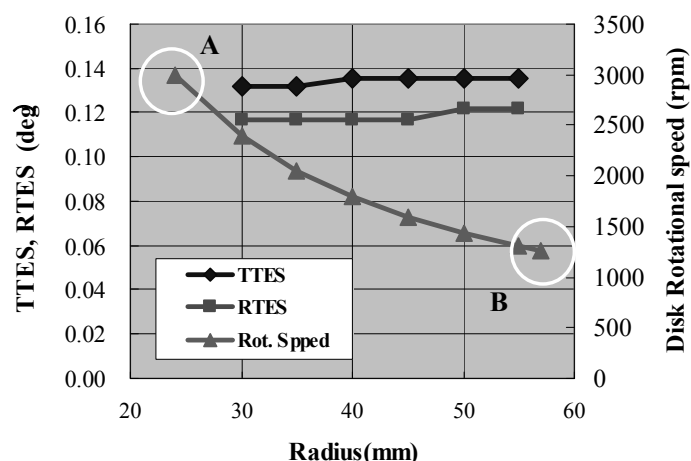


図4.4.1 チルトサーボ必要帯域の見積もり条件

必要帯域を見積もるにあたり、最内周の場合（条件A）と最外周の場合（条件B）の2つの場合を考える。まず、条件Aでは、ディスクの回転数は最大の 3000rpm であるが、傘チルトの影響がなく、チルト変動量は 0.14degPP である。従って、§ 3.3.3 で導入したリファレンスサーボによる帯域計算により、以下のように見積もられる。

最内周(r=24mm)の場合(3000rpm)

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 \cdot 1.2 \cdot 0.14 \cdot (2\pi \cdot 3000 / 60)^2}{0.14}} = 95 \text{ Hz} \quad \dots\dots\dots (4.4.2)$$

ただし、サーボマージンファクターを 1.2 としている。

次に、条件 B では、ディスクの回転数は最大の 1240rpm であるが、傘チルトの影響があり、チルト変動量は 0.3degPP である。従って、以下のように見積もられる。

最内周(r=58mm)の場合(1240rpm)

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 \cdot 1.2 \cdot 0.3 \cdot (2\pi \cdot 1240 / 60)^2}{0.14}} = 57 \text{ Hz} \quad \dots\dots\dots (4.4.3)$$

以上より、ディスク全面でのチルトサーボ動作を考えると式(4.4.2)かつ式(4.4.3)を両方満足する必要があることから、結局、チルトサーボ必要帯域は、95Hz 以上となる。

以上より、チルトサーボ仕様は表 4.4.2 に示すようになる。

表 4.4.2 チルトサーボ仕様

DCゲイン	> 6.6dB
サーボ帯域	> 95Hz

4.5 チルトサーボシステム

4.5.1 チルトアクチュエーター

チルトアクチュエーターとしては、タンジェンシャル及びラジアルチルトアクチュエーターとして 2 軸が必要である。この他、ギャップ軸、トラッキング軸が必要となることから、合計 4 軸のアクチュエーターが求められる。

4 軸アクチュエーターとしては、4 軸全てをボイスコイルモーター(Voice Coil Motor; VCM)で駆動するものもある[9]。しかしながら、VCM 型の 4 軸アクチュエーターの場合は、一般的に各軸の動特性をバランス良く性能を維持しつつ両立するのが難しい。そこで、本研究では、チルトアクチュエーターとして、従来の光ディスクシステムでも用いられており、実績のある 3 軸アクチュエーターと本アクチュエーターがマウントしてある基台をタンジェンシャル方向にチルトさせるアクチュエーター (チルトベースアクチュエーター) を組み合わせたアクチュエーターを導入した。図 4.5 に本研究で導入したチルトアクチュエーターを示す。

3 軸アクチュエーターとしては、DVD で用いられているボイスコイルタイプのアクチュエーターに近接場光ディスクシステム向けに SIL をマウントしたものを用いた。3 軸アクチュエーターは、ラジアルチルト軸、ディスク面垂直軸のギャップ軸、ディスク半径方向のトラッキング軸の 3 軸の可動軸をもつが、このうちラジアルチルト軸をラジアルチルトサーボ用アクチュエーターとして用いる。一方、チルトベースアクチュエーターは、ディスク面上での光スポット中心にタンジェンシャル方向にチルトさせる機構となっており、タンジェンシャルチルトサーボ用アクチュエーターとして用いる。

3 軸アクチュエーターは VCM 駆動であり、チルト電圧感度、可動チルト範囲は、それぞれ 0.95(deg/V)、±0.8deg である。チルトベースアクチュエーターはピエゾ素子駆動であり、チルト電圧感度、可動チルト範囲は、それぞれ 1.95×10^{-3} (deg/V)、±0.15deg である。これらの可動範囲は、表 4.4.1 に示したチルトサーボ仕様を満足している。

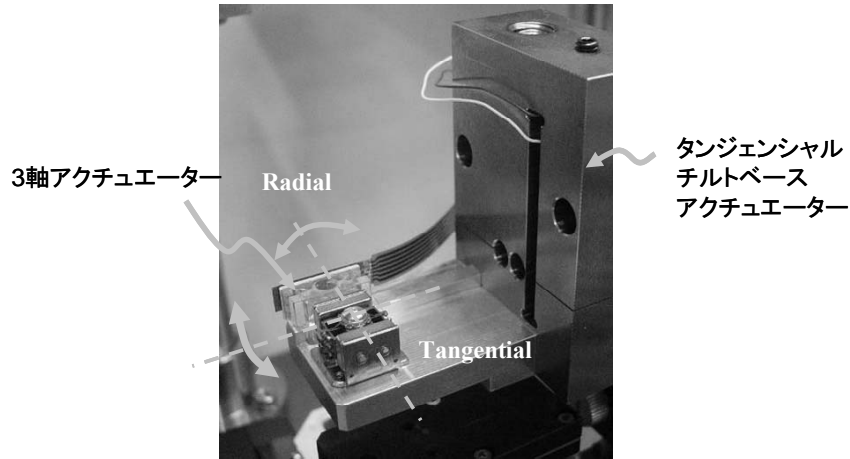


図4.5.1.1 チルトアクチュエーター

4.5.2 タンジェンシアルチルトサーボシステム

チルトベースアクチュエーター単体の周波数特性を図 5.2.1(a)に示す。表 4.4.2 から規定されるサーボ帯域を考慮して、400Hz、560Hz にある 1 次、2 次共振に着目して、モデル化する。一般に、N 個の共振を有する 2 次系システムは、式(4.5.2.1)として表現できる。s はラプラス演算子である。

$$P(s) = \sum_{i=1}^N \frac{p \cdot \omega_i^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_i \cdot s + \omega_i^2} \quad \dots\dots\dots (4.5.2.1)$$

400Hz、560Hz にある共振部の減衰係数は、それぞれシミュレーションにより $\zeta=0.07$ 、0.10 として算出した。その結果、タンジェンシアルアクチュエーターのモデル式として式(4.5.2.2)を得る。

$$P_{\text{tan}}(s) = \frac{6.3 \times 10^6}{s^2 + 351s + 6.3 \times 10^6} + \frac{1.2 \times 10^7}{s^2 + 703s + 1.2 \times 10^7} \quad \dots\dots\dots (4.5.2.2)$$

なお、本モデル化においては考慮されてない DC ゲインについては、ループゲイン調整を行うことで対処することにした。式(4.5.2.2)でモデル化した伝達関数の周波数特性を図 4.5.2.1(b)に示す。

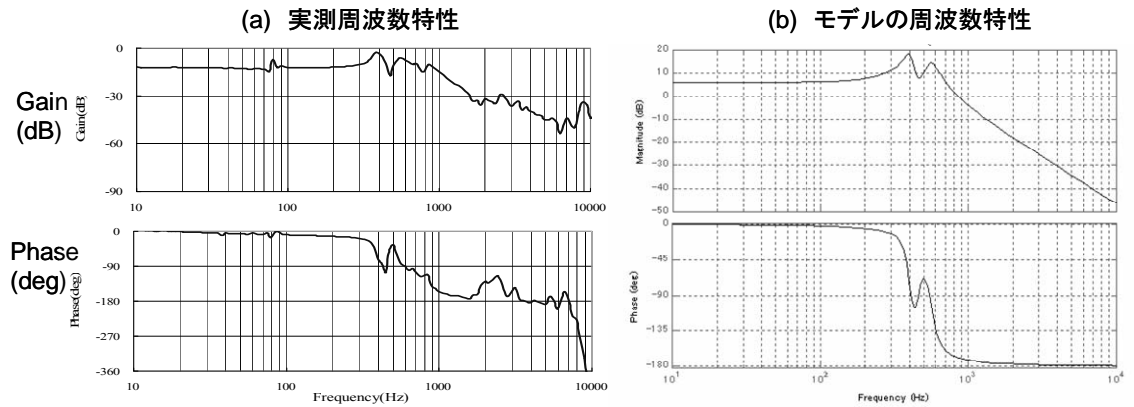


図4.5.2.1 チルトベースアクチュエーターの周波数特性

図 4.5.2.1(a)、(b)を比較すると、両者は、良く合致していることがわかる。次に、制御対象モデルに基づきサーボシステム設計を行った。制御系モデルに基づいて設計を行ったタンジェンシャルチルトサーボシステムの周波数特性（シミュレーション）を図 4.5.2.2 に示す。

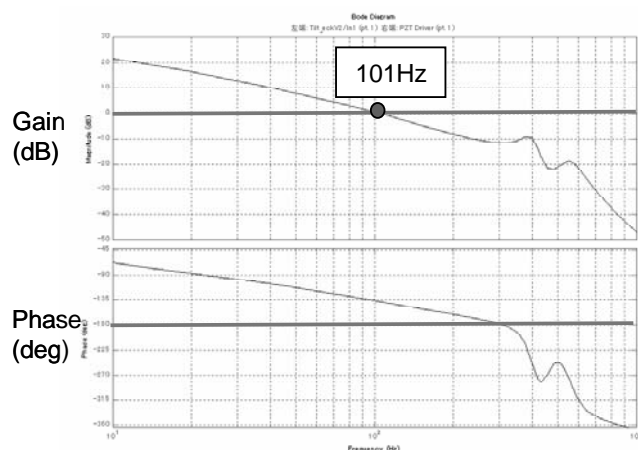


図4.5.2.2 タンジェンシャルチルトサーボの周波数特性(シミュレーション)

サーボフィルタとしては、近接する 1 次、2 次共振の影響を抑制するために、カットオフ周波数 5Hz、100Hz の 1 次ローパスフィルタを設定し、また、高域ノイズ成分を除去するためにカットオフ周波数 2kHz の 2 次ローパスフィルタを搭載した。シミュレーション値として、サーボ帯域が 101Hz、DC ゲインが 10Hz で 21dB、10Hz より十分低い場合で 28dB となり、表 4.4.2 に示すサーボ仕様を満足させることができた。また、ゲイン余裕は 12dB、位相余裕は 44deg であった。この結果を受けて、実際に開発したタンジェンシャルサーボシステムの周波数特性を図 4.5.2.3 に示す。

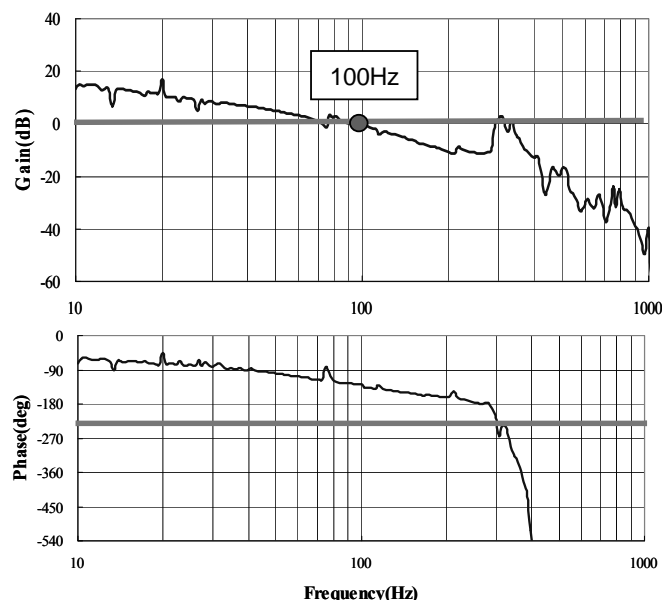


図4.5.2.3 タンジェンシャルチルトサーボの周波数特性(実測)

実測においても帯域 100Hz を確保することができた。10Hz での DC ゲインは 15dB で設計値よりも小さいが、サーボ仕様値の 6.6dB を 2 倍以上大きいゲインを確保することが確認できた。また、なお、ゲイン余裕は 10dB、位相余裕は 52deg であり、設計されたタンジェンシャルチルトサーボ

システムは安定であることが確認された。

4.5.3 ラジアルチルトサーボシステム

3 軸アクチュエーターのラジアル軸の周波数特性を図 4.5.3.1(a)に示す。表 4.4.2 から規定されるサーボ帯域を考慮して、215Hz の 1 次共振に着目してモデル化し、シミュレーションにより $\zeta=0.04$ として算出してモデル化することにより式(4.5.3.1)を得る。

$$P_{rad}(s) = \frac{1.4 \times 10^6}{s^2 + 105s + 1.8 \times 10^6} \quad \dots\dots\dots (4.5.3.1)$$

式(4.5.3.1)でモデル化した伝達関数の周波数特性を図 4.5.3.1(b)に示す。

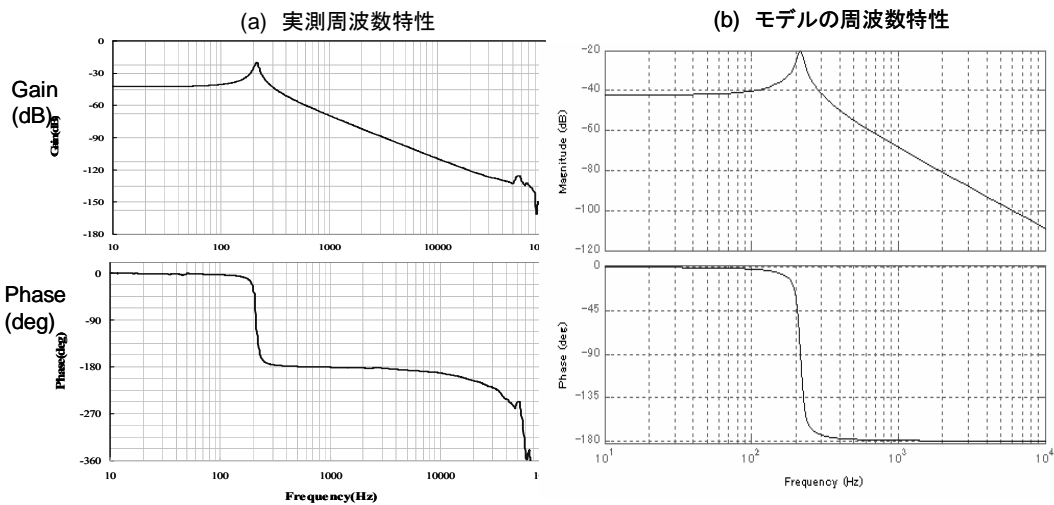


図4.5.3.1 3軸アクチュエーターの周波数特性(ラジアルチルト軸)

図 4.5.3.1(a)及び(b)を比較すると、良く合致していることがわかる。次に、制御対象のモデルに基づきサーボシステム設計を行った。制御系モデルに基づいて設計を行ったラジアルチルトサーボシステムの周波数特性 (シミュレーション) を図 4.5.3.2 に示す。

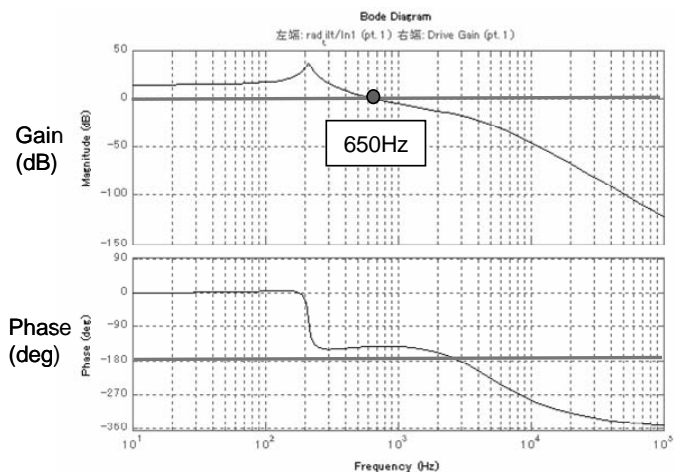


図4.5.3.2 ラジアルチルトサーボの周波数特性(シミュレーション)

サーボフィルタとしては、1 次共振の影響を避けるために、カットオフ周波数を 1 次共振周波数 215Hz 以上にし、かつ安定化を図るために、500Hz～1kHz をブーストする位相進みフィルタを採用し、また、高域ノイズ成分を除去するためにカットオフ周波数 2kHz の 2 次ローパスフィルタ

ーを搭載した。シミュレーション値として、サーボ帯域が 650Hz、DC ゲインが 10Hz で 14dB となり、表 4.4.2 のサーボ仕様を満足させることができた。また、ゲイン余裕は 17dB、位相余裕は 37deg であった。この結果を受けて、実際に開発したラジアルチルトサーボシステムの周波数特性を図 4.5.3.3 に示す。

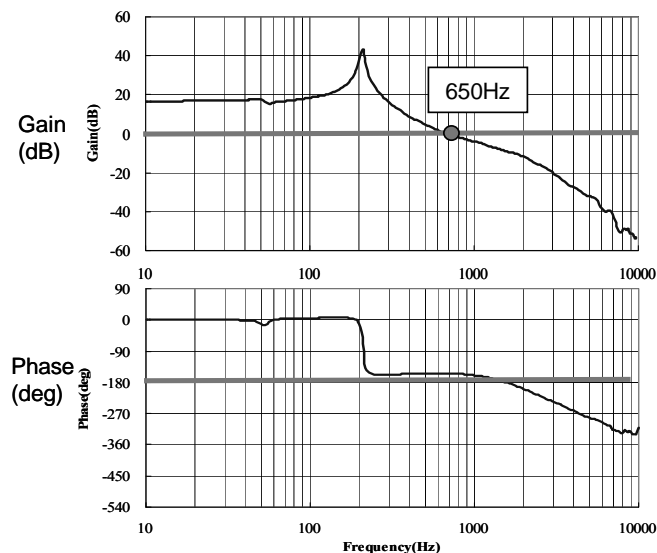


図4.5.3.3 ラジアルチルトサーボの周波数特性(実測値)

実測においても帯域 650Hz を確保することができた。10Hz での DC ゲインは 15dB で理論値と合致しており、サーボ仕様値の 6.6dB を 2 倍以上のゲインを確保することが確認できた。また、ゲイン余裕は 10dB、位相余裕は 26deg であり、設計されたラジアルチルトサーボシステムは安定であることが確認された。

4.6 3 軸アクチュエーターによるギャップサーボシステム

この節では、チルトサーボの前提となるギャップサーボシステムについて述べる。ギャップサーボは 3 軸アクチュエーターのギャップ軸を用いて行う。ギャップ軸の周波数特性を図 4.6.1(a)に示す。1 次共振は 48Hz であり、シミュレーションにより $\zeta=0.1$ として算出してモデル化することにより、2 次系モデルとして式(4.6.1)を得る。

$$P_{rad}(s) = \frac{9.3 \times 10^3}{s^2 + 61s + 9.3 \times 10^4} \quad \dots\dots\dots (4.6.1)$$

式(4.6.1)でモデル化した伝達関数の周波数特性を図 4.6.1(b)に示す。

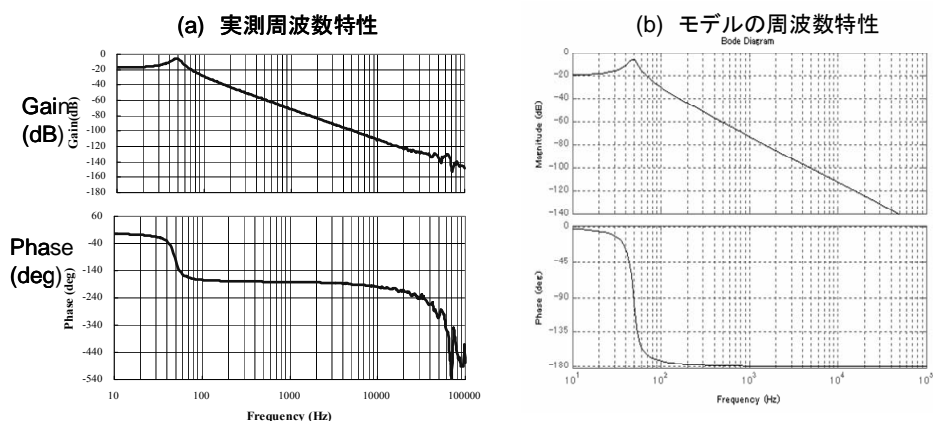


図4.6.1 3軸アクチュエーターの周波数特性(ギャップ軸)

両者は良く合致していることが確認できる。次に、制御対象モデルに基づきサーボシステム設計を行った。制御系モデルに基づいて行ったギャップサーボシステムの周波数特性（シミュレーション）を図 4.6.2 に示す。

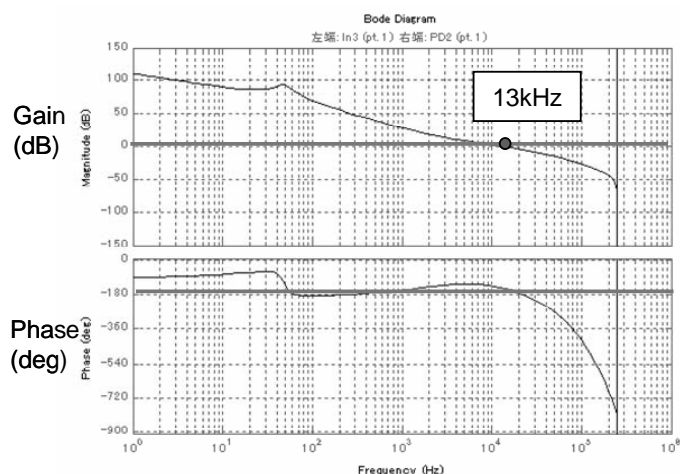


図4.6.2 ギャップサーボの周波数特性(3軸アクチュエーター)(シミュレーション)

サーボフィルタとしては、§ 3.4.3 で述べた 2 軸アクチュエーターによるギャップサーボと同様なフィルタを用いた。但し、この 3 軸アクチュエーターの場合は、2 軸アクチュエーターの場合とことなり、85kHz の高次共振がないため、85kHz のノッチフィルタは用いなかった。また、本実験では位相の安定マージンをさらに確保するため、AD を高速化し、サンプリング周波数を以前の 350kHz から 500kHz に上げた。その結果、シミュレーション値としては、2 軸アクチュエーターの場合と同様に 13kHz の帯域を確保でき、DC ゲインが 100Hz で 70dB であり、ゲインマージンは 4.7dB、位相マージンは 35deg であった。この結果を受けて、実際に開発したギャップサーボシステムの周波数特性を図 4.6.3 に示す。

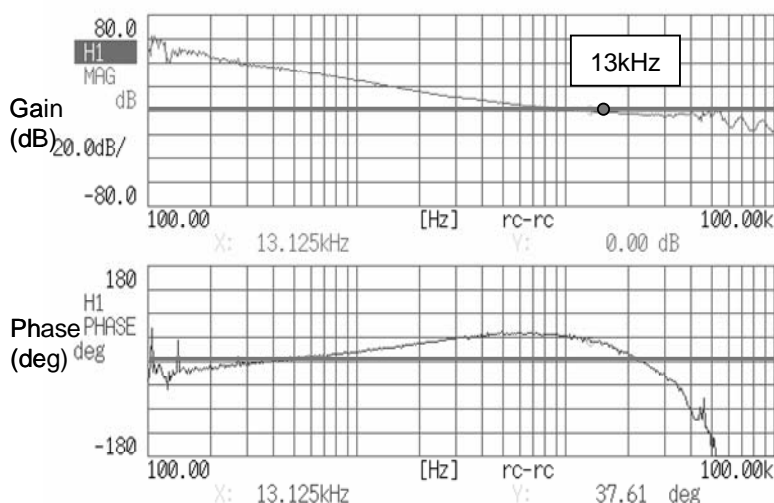


図4.6.3 ギャップトサーボの周波数特性(3軸アクチュエーター)(実測)

実測においても、§ 3.4.7 で述べた 2 軸アクチュエーターで実現されたサーボ帯域 13kHz を、3 軸アクチュエーターにおいても確保することができ、世界最高レベルのサーボ帯域を達成できた。また、100Hz での DC ゲインは 60dB で理論値よりも 10dB 小さいものの十分なゲインを確保することできている。一方、ゲイン余裕は 38dB、位相余裕は 4deg であり、シミュレーション値通りの余裕が得られており、開発されたギャップサーボシステムは安定であることが確認できた。

4.7 チルトサーボ効果

§ 4.6 で述べた 13kHz の高帯域ギャップサーボを用い、また、§ 4.3.2 で述べたようにチルトエラー信号のディスク回転数依存性を回避したもとの、タンジェンシャル、ラジアルサーボを行った実験結果を図 4.7.1 に示す。

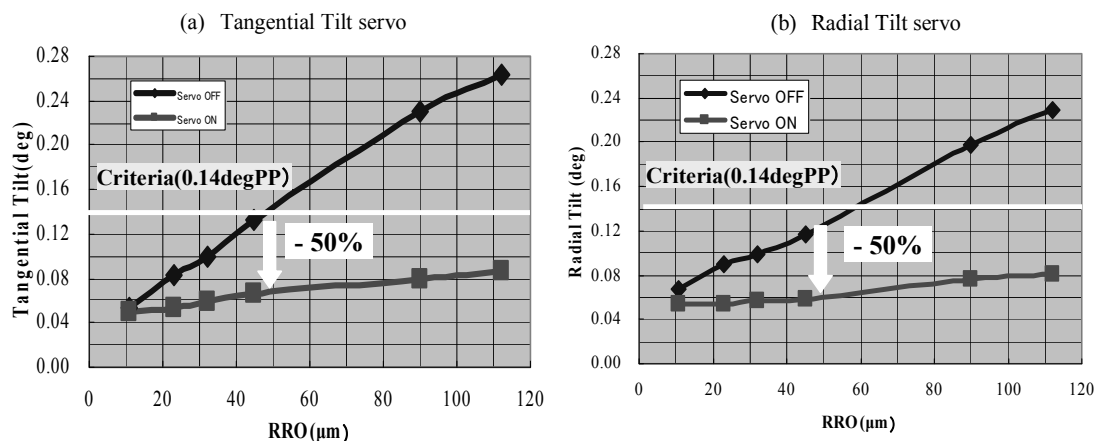


図4.7.1 チルトサーボ結果（ディスク回転数1200rpm、半径30mm）

本実験では、ディスク回転数を 1200rpm として、半径 30mm においてディスク面ぶれ量を変化させた場合のチルトサーボ前後のチルト量改善結果を示すものである。図 4.7.1 に示すように、タンジェンシャル、ラジアルの両軸において、チルトサーボの効果で、チルトマージンである 0.14degPP より十分に小さい値を実現している。例えば、半径 30mm における面ぶれ量 50 μm では 50% の軽減効果が確認された。

次に、表 4.4.1 で述べた近接場光ディスクシステム仕様に基づき、ディスク外周においてチルトサーボ結果を行った例を図 4.7.2 に示す。

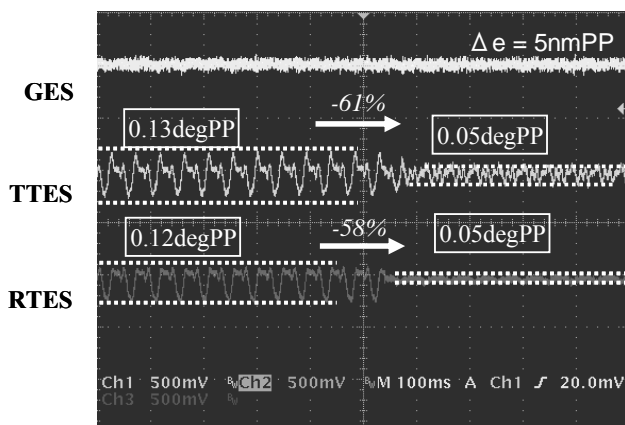


図4.7.2 チルトサーボ結果
（ディスク回転数1309rpm、半径55mm、ディスク面ぶれ量92 μm ）

本実験では、半径 55mm でのディスク回転数 1309rpm、面ぶれ量 92 μm でのチルトサーボ効果を実証した結果である。ギャップサーボについては、繰り返しサーボにより追従性を高めており、残渣ギャップエラーは 5nmPP 以下に抑制されている。チルトサーボの結果、タンジェンシャルチルトについては、0.13degPP から 0.05degPP になり、61%の改善効果が確認された。また、ラジアルチルトについては 0.12degPP から 0.05degPP になり、58%の改善効果が確認された。これらの結果から、外周でのチルト抑制効果が確認できた。

以上より、タンジェンシャルチルトベースアクチュエーターと3軸チルトアクチュエーターを組み合わせた4軸アクチュエーターを導入し、チルトサーボを適用することで、ディスクの面内面ぶれを約 $100\mu\text{m}$ を許容可能であることが実証できた。この結果、ディスク全面で、ディスク容量100Gbyte以上、データ転送レートが100Mbps以上の大容量近接場光ディスクが実現可能できた。

4.8 チルトエラー信号によるギャップサーボ改善手法[10]

§4.3.2において、光学式チルトエラーのギャップエラーに対する影響について考察した。そして、TTESがGESに対してディスク回転数、面ぶれに関して同様な傾向を示すことから、GESにより規格化することでディスク回転数依存性を回避できることを示した。また、ギャップの面ぶれ追従性を改善し、繰り返しサーボを導入することでギャップエラーを改善し、TTESのディスク回転数依存性を回避することを示した。一方、RTESはGESと異なる傾向を示し、ディスク回転数、面ぶれ量に依存せず一定であることを示した。

以上のことを考慮すると、ギャップエラー悪化の主要因はタンジェンシャル方向のエラー成分が支配的であるということがわかる。この事実、及び、ギャップエラーを改善することでTTESの改善可能であることを考えると、逆にTTESを、ギャップサーボシステムにフィードフォワードすることでGESを改善できると考えられる。

本節では、TTESを用いてギャップサーボ性能を改善する手法について考察する。

図4.8.1にギャップサーボブロックを示す。ここで、 s はラプラス演算子である。

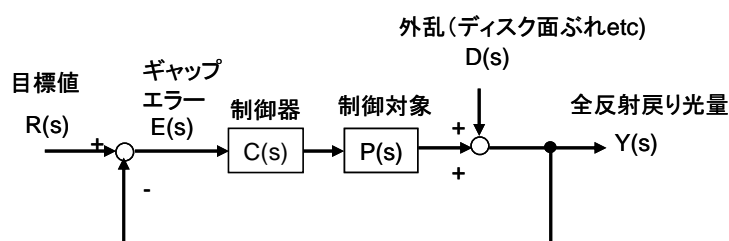


図4.8.1 ギャップサーボシステムのブロック図

図4.8.1において、エラー $E(s)$ と外乱である面ぶれ量 $D(s)$ との伝達関数は次式のようにになる。

$$E(s) = \frac{1}{1 + C(s)P(s)} D(s) \quad \dots\dots\dots (4.8.1)$$

従って、 $E(s)$ を生成し、打ち消すようにフィードフォワードサーボを行えば、内部モデル原理に基づき[11][12]、ディスク面ぶれ外乱の影響を回避し、ギャップ性能を高めることが可能となる。§3.4.6で導入した繰り返しサーボでは、式(4.8.1)で表現される $E(s)$ がディスク回転数に同期することに着目し、ディスク1回転分のGESをメモリに保存し、ディスク回転数に同期して記憶されたエラーを読み出してフィードフォワード信号としてギャップサーボループに印加することでギャップサーボ性能を改善した。

一方、§4.3.2 図4.3.2.2に示すようにGESとTTESとはディスク回転数、ディスク面ぶれに対して同様な挙動を示している。図4.8.2にディスク回転数3000rpm、面ぶれ量 $43\mu\text{m}$ の場合のGESとTTESを示す。図4.8.2より、波形形状、位相の点でも同様な挙動を示すことがわかる。

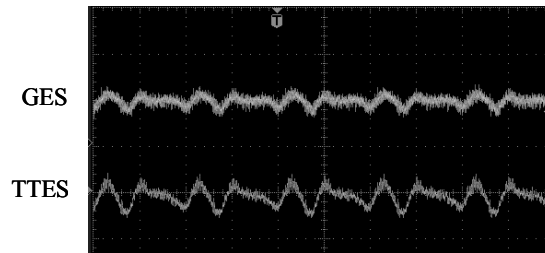


図4.8.2 GESとTTESの波形相関
(ディスク回転数3000rpm; ディスク面ぶれ量43μm)

これは、以下のように説明できる。図 4.8.1 において、制御器 $C(s)$ は、§ 3.4.3 に示すように積分器 $1/s$ を内包しており、また、ゲインは 1 より非常に大きくなっている。従って、低域においては、次式ようになる。

$$C(s) \approx \frac{1}{s} \quad \dots\dots\dots (4.8.2)$$

$$C(s)P(s) \gg 1 \quad \dots\dots\dots (4.8.3)$$

従って、式 (4.8.1) ～式(4.8.3)からギャップエラーは以下ようになる。

$$E(s) \approx s \cdot D(s) \quad \dots\dots\dots (4.8.4)$$

一方、TTES は § 4.3.1 図 4.3.1.3 に示すように、原理的にディスク面ぶれ $D(s)$ の微分に相当する。従って、次式ようになる。

$$TTES \approx s \cdot D(s) \quad \dots\dots\dots (4.8.5)$$

従って、式 (4.8.4) 及び式(4.8.5)から、 $E(s)$ は TTES と等価であることから、次式の関係が成り立つ。

$$GES \approx TTES \quad \dots\dots\dots (4.8.6)$$

以上から、図 4.8.2 に示すように、GES と TTES は合致すると考えられる。

従って、式(4.8.1)で示す GES は TTES を推定値とし、内部モデル原理に基づいてギャップサーボのメインループにフィードフォワードすることでギャップ性能が改善できると考えられる。図 4.8.3 に、本節で提案する TTES フィードフォワードサーボのブロック図を示す。

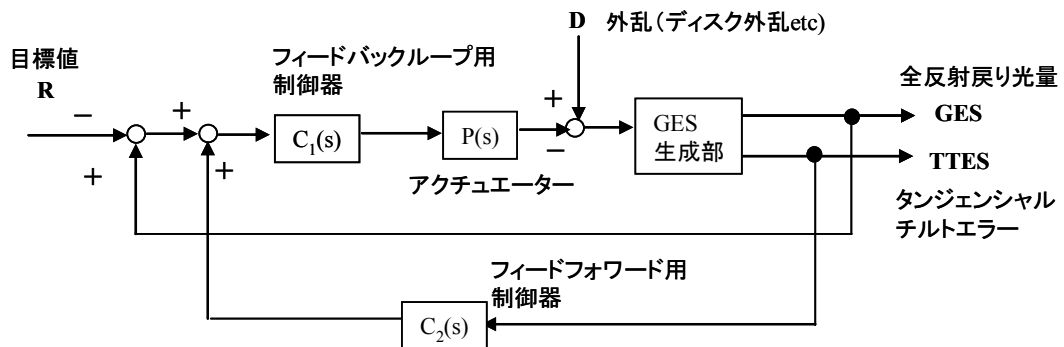


図4.8.3 TTESフィードフォワードサーボ

図 4.8.1 に示すフィードバックサーボのみからなるギャップサーボシステムに、TTES のフィードフォワード信号を追加したシステムとなっている。GES 生成部は、具体的には、SIL 端面での全反射戻り光量を § 4.3.1 で示す 4 分割フォトディテクタで受光し、GES 及び TTES を式(4.3.1.1)、式(4.3.1.3)の演算にて生成する部分である。GES については、従来通りフィードバックサーボに用いる。TTES については、フィードフォワードループ用の制御器 C_2 を通して、フィードバックループ部にフィードフォワード入力される。本実験では、具体的に C_2 として、高域部のノイズ成分を抑制するための帯域 2kHz の 2 次ローパスフィルター及び可変ゲインを用いた。

図 4.8.4 に、実際に TTES フィードフォワードサーボを適用した実験結果を示す。本実験では、ディスク回転数を 3000rpm、ディスク面ぶれ量を $43\mu\text{m}$ とした場合の TTES フィードフォワードサーボの適用前後の様子を示している。

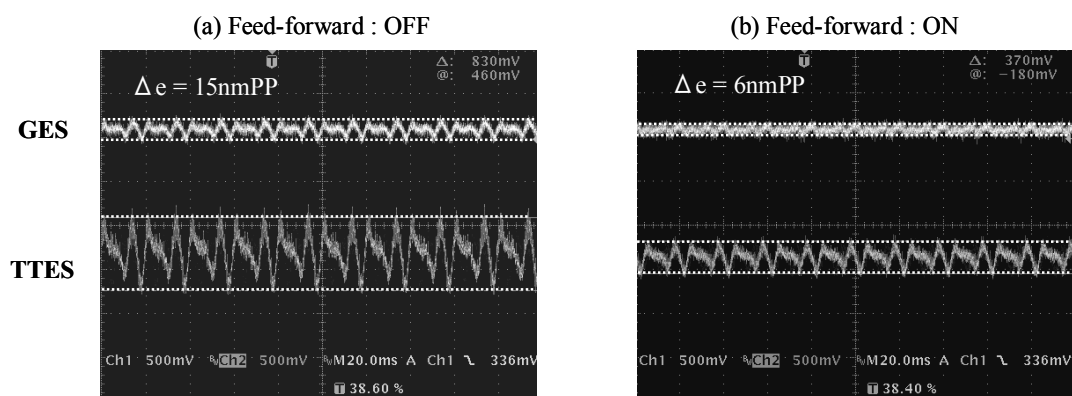


図4.8.4 TTES フィードフォワードサーボ
(ディスク回転数3000rpm; ディスク面ぶれ量 $43\mu\text{m}$)

図 4.8.4 より、TTES をフィードフォワードする前は、GES がディスク回転成分により悪化し 15nmPP となっている。また、TTES も振幅が大きくなっており悪化している。これは、§ 4.3.2 で述べた結果とも合致している。一方、TTES 信号をフィードフォワードした後は、ディスク回転成分が抑制され 6nm となっている。そして、それに伴い TTES も振幅が小さくなり、改善している。

図 4.8.5 に、半径 30mm において面ぶれ量を変化させ、かつディスク回転数を 400、1200、2000、3000rpm と変化させた場合の TTES フィードフォワード後の面ぶれと TTES の関係を示す。

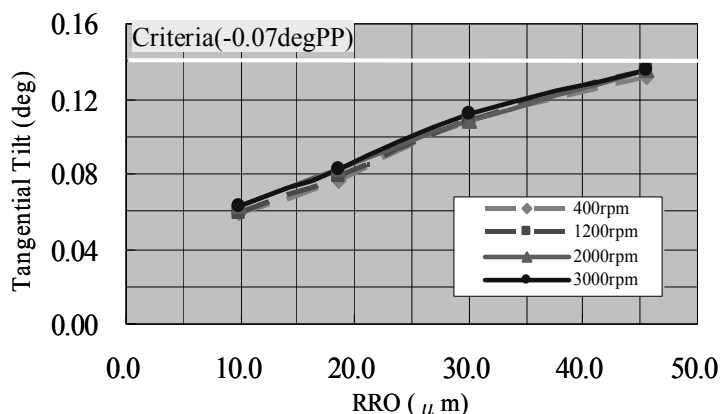


図4.8.5 TTESフィードフォワードサーボ後のディスク面ぶれとTTESとの関係

なお、TTES フィードフォワード前の関係は図 4.3.2.2(b)に示すようである。図 4.8.5 に示すように TTES をギャップサーボのフィードフォワード信号として用いることでギャップ追従性を改善し、図 4.3.2.3 に示す GES による規格化手法や、図 4.3.2.6 に示す繰り返しサーボによるギャップ追従性改善手法の結果と同様に、ディスク回転数依存性を回避することに成功している。また、第 3 章 § 3.4.6 に示す繰り返しサーボによる GES 追従性改善手法による結果と等価な関係を得ていることが確認された。

本手法によれば、繰り返しサーボではディスク 1 回転分の GES を保存するメモリが必要とされるのに対して、本提案による TTES のよるフィードフォワードサーボでは、上記メモリが不要となるという利点がある。なお、§ 4.5 で述べたチルトサーボと併用する場合には、繰り返しサーボの場合と同様にメモリが必要となる。この場合には、TTES が GES 同様にディスク回転同期であることから、TTES によりギャップサーボを改善した後に、TTES をディスク 1 回転分メモリに保存し、メモリ保存した信号にてフィードフォワードを行いつつ、TTES によるチルトサーボを行えばよい。

以上より、本節で提案する TTES 信号をギャップサーボループにフィードフォワードすることで、ギャップサーボ性能の改善が可能である。

4.9 まとめ

本章では、SIL とディスク間のナノギャップにおけるチルト問題について述べた。

近接場光ディスクシステムでは、従来の光ディスクシステムと異なり、チルトマージンが収差などの光学的要因で決まるのではなく、SIL とディスクが物理的に接触することによる機械的要因で決まる。例えばギャップが 25nm のときには、チルトは 0.14degPP 程度しか許容されない。

この問題を解決するために、まず、SIL とディスク間のディスク依存性ない初期チルト補正手法として、ギャップエラーにより補正する手法を開発し、その有効性を明らかにした。

一方、ディスク依存性があるチルトについては、ギャップエラーから光学的に検出できる手法を開発した。この手法は、ディスクの周方向、半径方向のチルトをそれぞれのギャップエラーのプッシュプル演算することにより検出するものである。当該光学的に検出されたチルトエラー信号はギャップサーボ性能性への依存性があるが、ギャップサーボのディスク面ぶれ追従性を高めた信号にてチルトサーボを行うことで回避できることを示した。

また、ディスク全面での近接場記録再生を行う観点からチルトサーボ仕様を明らかにし、チルトサーボ仕様に基づき、3 軸の VCM 型アクチュエーターとチルトベースアクチュエーターを組み合わせた新規のチルトアクチュエーターを開発し、ナノギャップ間のチルトサーボの効果を確認した。この結果、ディスク面ぶれ量 100 μ m を許容し、ディスク容量 100Gbyte 以上、データ転送レート 100Mbps 以上をディスク全面で達成する近接場光ディスクシステムが可能であることを実証した。

最後に、ギャップエラーの悪化要因がディスク周方向成分のエラー成分が支配的であることを明らかにし、当該成分をギャップサーボシステムにフィードフォワードすることで、ギャップサーボ性能を高精度化する新規のサーボ手法を開発し、その効果を実証した。

参考文献

- [1] 石本 努、齊藤公博、“チルト制御方法及び光ディスク装置”、特許公開番号 2005-259329
- [2] 石本 努、金 善敏、齊藤公博、近藤高男、中沖有克、川久保 伸、“ニアフィールド光ディスクシステムにおけるチルトサーボ技術”、電気学会 産業計測制御研究会、IIC-07-116、pp 1-6 (2007)
- [3] C.A. Verschuren, F.Zijp, D.M. Bruls, J.I. Lee, J.M.A van den Eerenbeemd, K.Saito, and T. Ishimoto: “Cover-layer incident Near-Field recording : towards 4-layer discs using dynamic tilt control”, Proc. SPIE 6282, M1-M10 (2006)
- [4] 茂木康夫、“情報記録再生装置”、特許第 3405929 号
- [5] 藤井 仁、三東武生、山本 寛、山田真一、山口博之、“チルト制御アクチュエーターの開発”、計測自動制御学会関西支部シンポジウム、T704、pp.80-83 (1999)
- [6] T. Ishimoto, T.Matsui, S. Kim, K. Saito, K. Takagi, S. Haga, A. Nakaoki, and M.Yamamoto: “Technologies for Removability in a Near-Field Optical Disc System”, Proc. SPIE 6282, C1-C10 (2006)
- [7] T. Ishimoto, S. Kim, T. Yamasaki, T. Yukumoto, S.Kim, A. Nakaoki, and M.Yamamoto: “Approach of Improving Disk Performance to High-Quality Gap control in Near-Field optical Disk Drive System”, Jpn. J. Appl. Phys. 44, pp.3981-3986 (2007)
- [8] A.Nakaoki, M.Shinoda, K.Saito, T.Ishimoto, T.Horigome, K.Takagi, and M.Yamamoto: “Over 100GB Optical Phase Change Disc System Realized by Near-Field Technology”, E*PCOS Symp. Programme, No.24 (2005)
- [9] Y.Motegi, M.Nagasato, Y.Ishibashi, H.Someya, and N.Kikuri, “Development of Tilt Servo System using 4-Axis Lens Actuator for Disc Tilt Compensation”, Proc. SPIE vol.3864, pp.20-22 (1999)
- [10] T.Ishimoto, S.Kim,K.Saito,T.Kondo, A.Nakaoki, and O.Kawakubo, “Servo Technologies in a Near-Field Optical Disk Drive System”, Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory, pp.50-51 (2007)
- [11] G.Begtsson, “Output Regulation and Internal Models – a Frequency Approach”, Automatica, **13**, pp. 333-345 (1975)
- [12] 原 辰次、“繰り返し制御”、計測と制御、Vol.25, No.12, pp.51-59 (1986)

第5章 コンポーネント改善によるナノギャップ技術

5.1 はじめに

本章では、コンポーネント性能を改善する手法によるナノギャップ高精度化技術について述べる。

前章までは、スピンドルモーターにクランプされたディスクを回転させることによる面ぶれに対して、固体浸レンズ（Solid Immersion Lens: SIL）が搭載されたアクチュエーターを用いて近接場状態を維持するためのナノ精度でのギャップサーボ技術、及びチルトサーボ技術について述べてきた。しかしながら、ナノ精度のサーボを実現するには、サーボ性能の改善だけでは限界があり、同時に制御対象の改善、外乱源の抑制を図る必要がある。

そこで、本章では、近接場光ディスクシステムを構成するコンポーネントの中で、ナノギャップサーボに直接的に影響を及ぼす、制御対象であるレンズアクチュエーター、外乱源であるディスク、スピンドルモーターの3点に着目して、これらのコンポーネント改善による手法について述べる。

まずディスク面の共振現象に着目しギャップサーボ性能を改善、安定化する手法について述べる。次に、レンズアクチュエーターを改善するギャップサーボ性能の改善、最後に、スピンドルモーターの改善によるギャップサーボ性能の改善について述べる。

5.2 ディスク面共振抑制化手法[1]

5.2.1 ディスク面共振問題

近接場光ディスクシステムでは、従来の光ディスクシステムと同様に、ポリカーボネード単板のディスクを用いている。そして、ディスク面ぶれに追従し、近接場光を安定して発生させる手法として、高帯域のフィードバックサーボを行い、また、残渣ギャップエラーの回転同期の繰り返し成分に着目し、繰り返しサーボによる学習サーボを導入した。その結果、ディスク面ぶれ $40\mu\text{m}$ で 3000rpm 回転するディスクに対して、目標の 5nmPP 精度の追従精度を達成し、制御目標を達成することができた。しかしながら、ディスク半径によっては、仕様を満足しない場合がある。これは、近接場光ディスクシステムのディスク全面での記録再生動作の観点からは望ましくない。そこで、本節では、この原因を考察するとともに、高速ディスク回転による高転送レート化を、より安定化すること図った。

図 5.2.1.1 に、同一クランプ状態で、回転数、半径を変化変えた場合のギャップエラー (Gap Error Signal; GES)、及びその FFT 結果を示す。

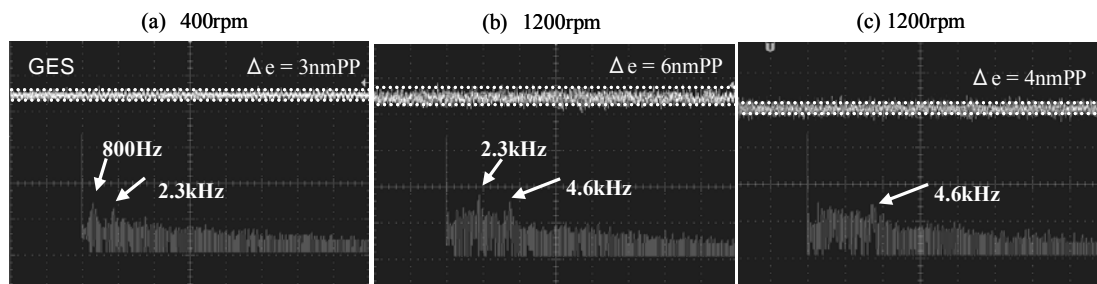


図5.2.1.1 ギャップエラーとFFT解析結果

図 5.2.1.1 より、以下のことがわかった。

- ① 800Hz、2.3kHz、4.6kHz などの特定の振動成分がある。
- ② 上記振動成分の振動振幅は不定である。
- ③ 上記振動成分は、回転非同期である。
- ④ 上記振動成分は、半径依存性がある。
- ⑤ 上記振動成分は、システム依存性はなく常に観察される。

図 5.2.1.1 で示す振動成分は、②、③のことから、§ 3.4.6 で導入した繰り返しサーボによるギャップエラーの抑制は困難であり、この振動が高速回転数時の GES の悪化をもたらす一因であることがわかった。この振動成分を抑制できれば、GES をより安定化できると期待される。この振動の原因については、②、③に加えて④、⑤の特徴を考え合わせると、ディスク面共振であると考えられる。そこで、これらの振動がディスク面共振であること確認するために、ディスク回転数を 3600rpm から静止まで連続的に変化させて、ディスク面の振動をレーザードップラー計を用いて調べた。その結果を図 5.2.1.2 に示す。

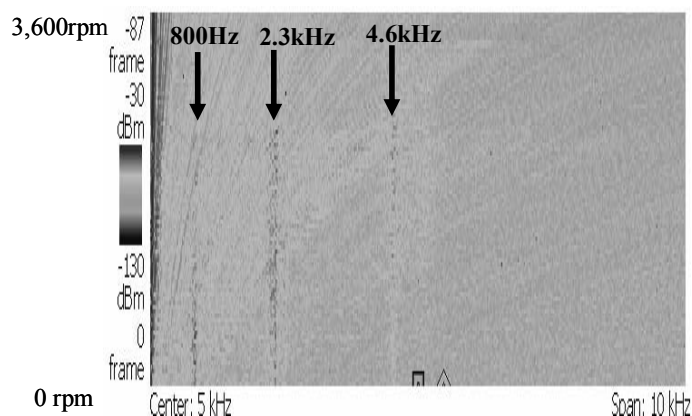


図5.2.1.2 ディスク面振動のFFT解析結果(3600rpm～0rpm)

図 5.2.1.2 より、回転非同期の 800Hz、2.3kHz、4.6kHz の振動成分が観察された。これは、ギャップエラーに重畳する回転非同期の振動成分と合致しており、ギャップエラー品質を悪化させている原因がディスク面共振であることが明確になった。これらの振動に対する 800Hz、2.3kHz、4.6kHz でのサーボゲインは、帯域 13kHz でのサーボにおいて、それぞれ、30dB、15dB、10dB である。許容残渣ギャップエラーが 5nmPP であることを考慮すると、それぞれの振動成分での許容振動振幅は、それぞれ 160nm、30nm、16nm となる。これらの振動成分は、従来の光ディスクシステムではフォーカス深度内であり、問題とならない量である。例えば、Blu-ray システムでは、フォーカス深度は約 600nmPP であり、現在、問題となっている 800Hz などの振動振幅は問題とならない。一方、近接場光ディスクシステムでは SIL とディスクとのギャップ間が 25nm 程度であり、800Hz などの振動成分の許容振動振幅とギャップを比較すると、ディスク振動は同様もしくはそれ以上となっており問題となることがわかる。つまり、現在、問題となっているディスク共振問題は、近接場光ディスクシステムになって初めて顕在化する問題であると言える。

5.2.2 ディスク面共振モード

近接場光ディスクシステムではディスク面共振が問題となることがわかった。本節では、問題となるディスク面共振のモードを調べた結果について述べる。

ディスク面共振を引き起こす加振源は、スピンドルモーターであると考えられる。そこで、ディスククランプ部を加振器で振動させることでディスク面を振動させ、そのもとでディスク面振動をスキャニングレーザードップラー計によりディスク全面の振動の様子を調べた。図 5.2.2.1 に実験装置を示す。



図5.2.2.1 ディスク面振動計測実験装置

スキャニングレーザードップラー計で計測されたディスク全面での振動データから、共振ピーク周波数、及びその周波数でのディスク面での共振の様子を調べた結果を図 5.2.2.2 に示す。

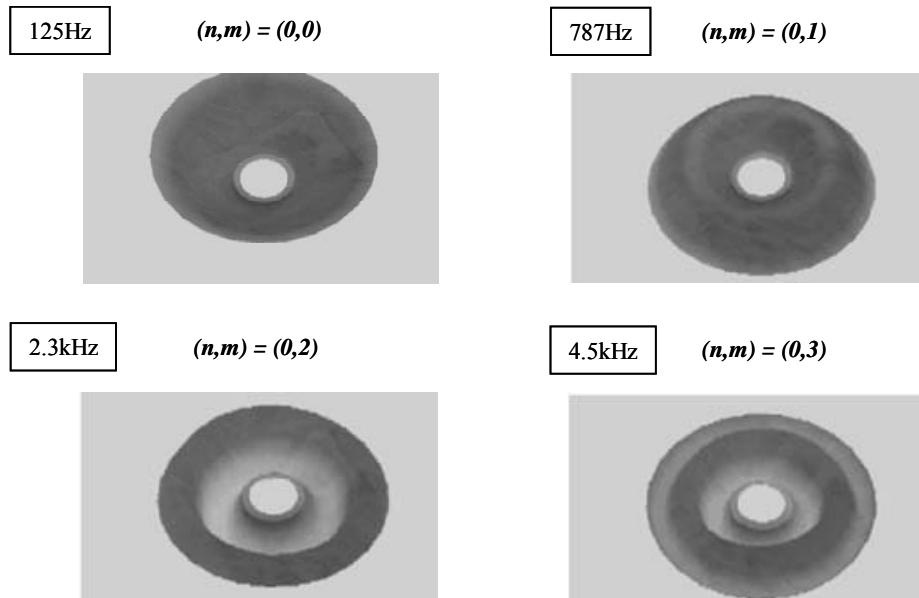


図5.2.2.2 ディスク面共振の実測結果

図 5.2.2.2 より共振周波数は、125Hz、787Hz、2.3kHz、4.5kHz であることがわかった。これらの周波数は GES に重畳している振動成分とよく合致している。また、これらの振動周波数での振動振幅は、それぞれ $\pm 10 \mu\text{m}$ 、 $\pm 300\text{nm}$ 、 $\pm 30\text{nm}$ 、 $\pm 1\text{nm}$ であり、ギャップ長 25nm、許容残渣ギャップエラーが 5nmPP である近接場光ディスクシステムでは、高次の共振成分も十分にギャップエラーに影響しうることがわかる。なお、125Hz 振動についてはギャップエラー信号では観察されないが、125Hz におけるサーボゲインは 60dB 以上であり、十分なサーボ帯域内であることから、たとえ共振の影響があっても十分に抑制されており、観察されないと考えられる。また、半径方向の節の数を n 、円周方向の節の数を m とし、 (n,m) で振動モードを表現すると、これらの振動はそれぞれ、 $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(0,2)$ 、 $(0,3)$ モードとなり、いずれも同心円上共振モードであることもわかった。このことは、§ 5.2.1 で述べた GES に重畳する振動成分の性質が①～⑤を示すこととも合致する。

また、ディスク共振現象についてシミュレーションでも調べた。現状の近接場光ディスクシステムで用いている 1.1mm(以下、1.1t と表記)のポリカーボネード基板について、有限要素法の振動シミュレーション結果を図 5.2.2.3 に示す。

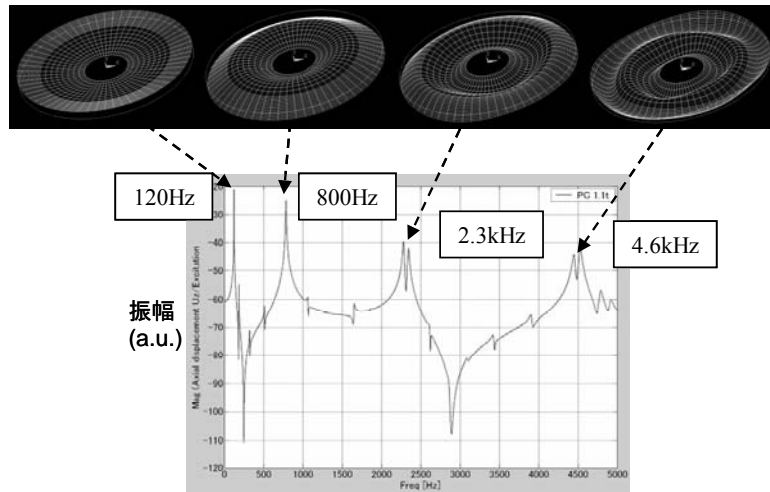


図5.2.2.3 1.1tポリカ基板ディスク共振(シミュレーション)

図 5.2.2.3 に示すように、シミュレーションからも、実測結果と同様な周波数の同一円周状の共振が存在することが確認できた。

5.2.3 ディスク面共振抑制

現状の 1.1t ポリカーボネイト基板単体では、ディスク共振の影響によりギャップサーボ性能が悪化することが判明した。そこで、本節では、基板の物理特性を改善してディスク共振を抑制することでギャップサーボ性能を高精度化する手法について述べる。

ディスク共振を抑制するために、ディスク基板のダンピング性能に着目した。ダンピング性能を改善するために、DVD で採用されている貼り合わせディスク構造のディスクを用い、貼り合わせする接着剤にダンピング性能を持たせることで、ディスク全体のダンピング性能を向上するようにした。具体的には、厚さ 0.6mm (以下、0.6t と表記) のポリカーボネイト基板を、厚さ 50 μ m の紫外線硬化樹脂で貼り合わせたものと、同じ厚さで圧力感度粘着剤 (Pressure Sensitive Adhesive ; PSA) で貼り合わせたものを用意した。前者の樹脂は、CD、DVD など一般的に用いられるものである。後者は、Blu-ray で用いられているものである。以下、前者を UV 貼り合わせディスク、後者を PSA 貼り合わせディスクと呼ぶ。図 5.2.3.1 に実験に用いたディスク構造を示す。



図5.2.3.1 実験に用いたディスク構造

これらのディスク材料のダンピング性能を評価するために、6mm×90mm の長方形に基板をカットしたサンプルをピエゾアクチュエーターで加振し、サンプル面の振動をレーザードップラー計にて計測することで Q 値を計測した[2]。実験装置図を図 5.2.3.2 に示す。また、計測された Q 値を図 5.2.3.3 に示す。

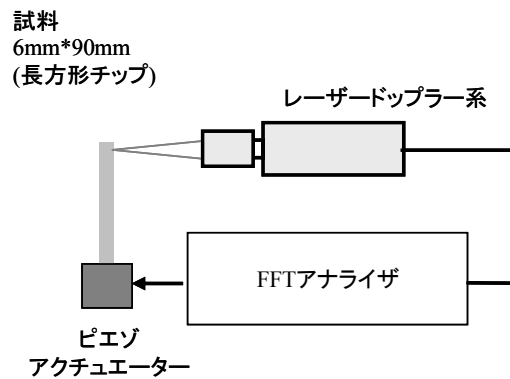


図5.2.3.2 ディスク材料のダンピング特性計測実験装置

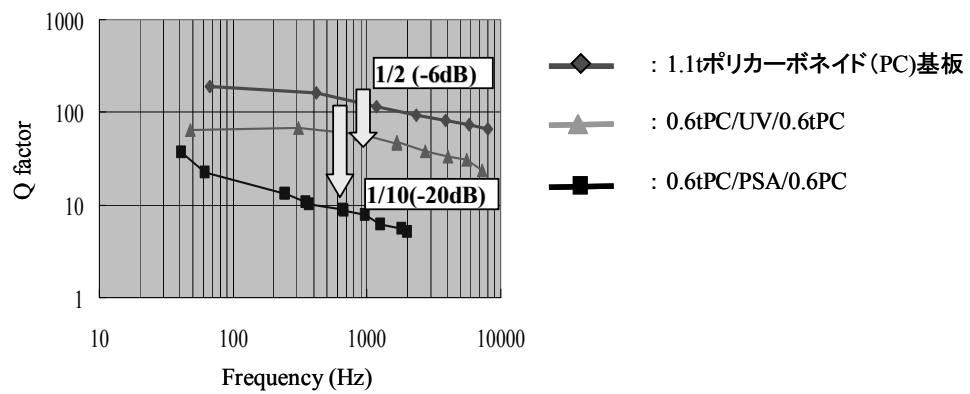


図5.2.3.3 ディスク基板材料のQ値(実測)

図 5.2.3.3 より、UV 貼り合わせディスク、PSA 貼り合わせディスクの Q 値は、従来のポリカーボネード単板ディスクの場合と比較して、それぞれ 1/2、1/10 となり、高ダンピング効果が確認できた。また、120mm のディスク形状でのディスク共振を測定した。この実験では、図 5.2.3.4 に示すように、ディスクを加振器で強制加振し、ディスク面の共振半径での振動をレーザードップラー計にて計測した。その結果を図 5.2.3.5 に示す。

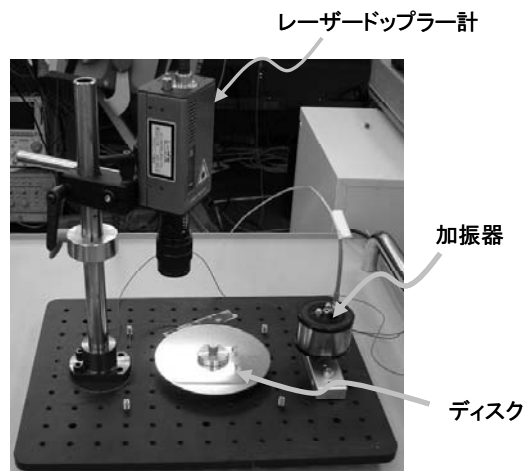


図5.2.3.4 ディスク面共振周波数測定装置

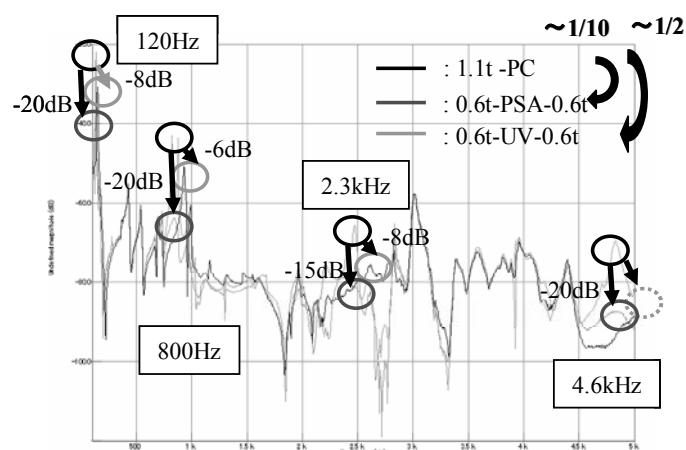


図5.2.3.5 ディスク面共振の抑制効果（実測）

図 5.2.3.5 より、現在、問題としているディスク共振周波数での振幅が、ディスク材料単体でのダンピング効果と同等に、UV 貼り合わせディスクの場合は 1/2 に、PSA 貼り合わせディスクの場合は 1/10 に抑制されていることがわかった。また、ディスク中心のクランプ面を加振源とした場合のシミュレーション結果を図 5.2.3.6 に示す。

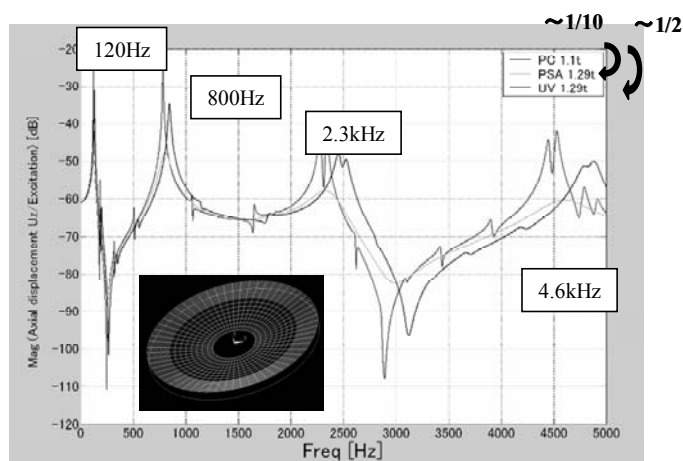


図5.2.3.6 ディスク面共振の抑制効果（シミュレーション）

図 5.2.3.6 のシミュレーション結果は、図 5.2.3.5 の実測結果とよく合致しており、シミュレーション結果からも PSA 貼り合わせディスクの低ダンピング特性による共振抑制効果が確認できた。最後に、基板材料を変えて、図 5.2.1.2 と同様に、ディスク回転数を 3600rpm から静止させたときのディスク面振動をレーザードップラー計にて計測した結果を図 5.2.3.7 に示す。

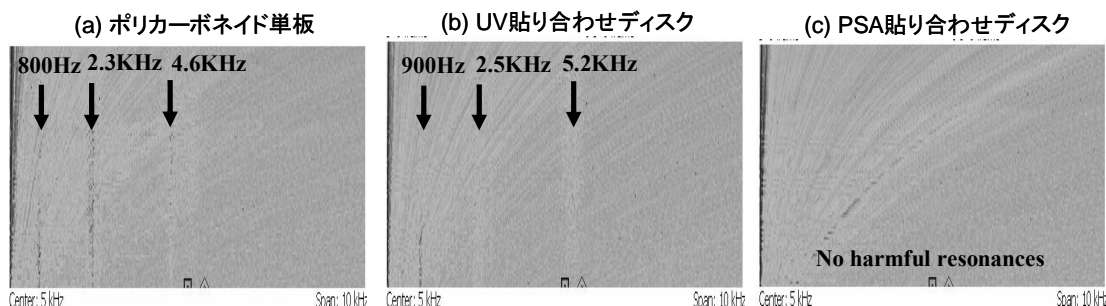


図5.2.3.7 ディスク面振動のFFT解析結果（3600rpm～0rpm）

図 5.2.7 より、貼り合わせディスクに構造にすることでディスク共振が抑制されており、特に PSA 貼り合わせディスクの場合は、問題となるディスク共振が十分に抑制されていることがわかる。

以上、図 5.2.3.3、5.2.3.5、5.2.3.7 より、PSA 貼り合わせディスクがディスク共振抑制効果が高く、ギャップエラー改善が期待できることがわかった。

5.2.4 ディスク面共振抑制によるギャップ性能改善

本節では、PSA 貼り合わせディスクによるギャップサーボ性能の改善効果について検証する。図 5.2.4.1 に、ポリカーボネードディスク単板の場合と PSA 貼り合わせディスクの場合のギャップサーボ結果、及びギャップエラーの FFT 結果を示す。共にディスク回転数は 1200rpm で、ディスク面ぶれ量は、ポリカーボネードディスクの場合は $20\mu\text{m}$ 、PSA 貼り合わせディスクの場合は若干大きく $23\mu\text{m}$ となっている。また、本実験ではギャップ目標値は 20nm とし、サーボ帯域 13kHz の高帯域ギャップサーボを用いた。

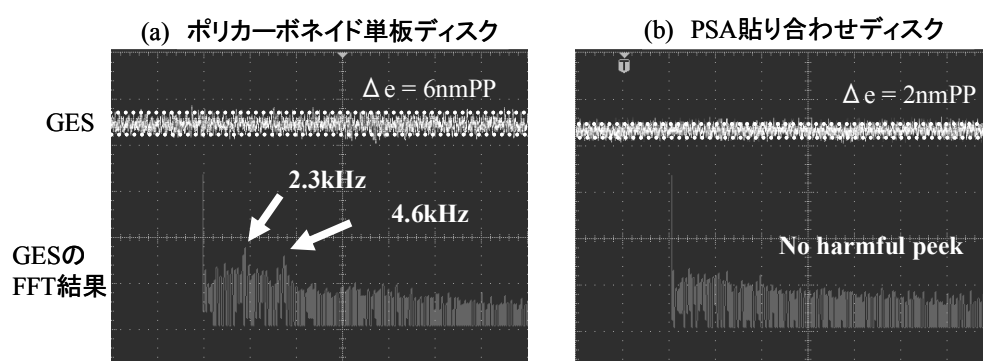


図5.2.4.1 低共振ディスクによるギャップサーボ性能の改善効果

図 5.2.4.1 より、従来のポリカーボネードディスクの場合は、残渣ギャップエラーが 6nmPP であり、その周波数成分を調べると、2.3kHz、4.6kHz のディスク共振成分が観察され、ギャップサーボ性能を悪化させていることがわかる。一方の PSA 貼り合わせディスクの場合は、ディスク面ぶれ量が若干大きいにもかかわらず、残渣ギャップエラーが 2nmPP となり、ポリカーボネード単板の場合と比較して 1/3 の改善に成功している。また、ギャップエラーの FFT 結果調べると、共振成分は見られず、期待通りにディスク共振の抑制に成功した。

次に、ディスク回転数と残渣ギャップエラーの関係を調べた。その結果を図 5.2.4.2 に示す。本実験ではディスク面ぶれ量を $48\mu\text{m}$ であり、ディスク共振半径 ($R=30\text{mm}$) において、実験を行った。

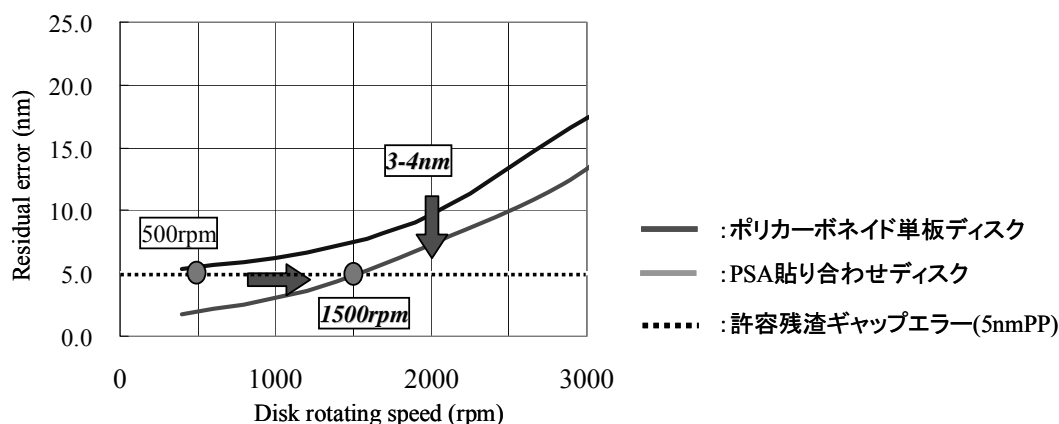


図5.2.4.2 ディスク回転数と残渣ギャップエラー（メインサーボループのみ）

図 5.2.4.2 より、従来のポリカーボネイドディスクでは、ディスク共振がある半径においては、5nmPP での残渣エラーを実現するには、500rpm が限界であるとわかった。一方、PSA 貼り合わせディスクの場合は、同一条件にて 1500rpm まで回転が可能であり、この回転数において、ポリカーボネイドディスク単板の場合と比較して 3~4nm のギャップエラー改善効果が確認できた。次に、図 5.2.4.2 での実験において、§ 3.4.6 で導入した繰り返しサーボを併用した場合を図 5.2.4.3 に示す。

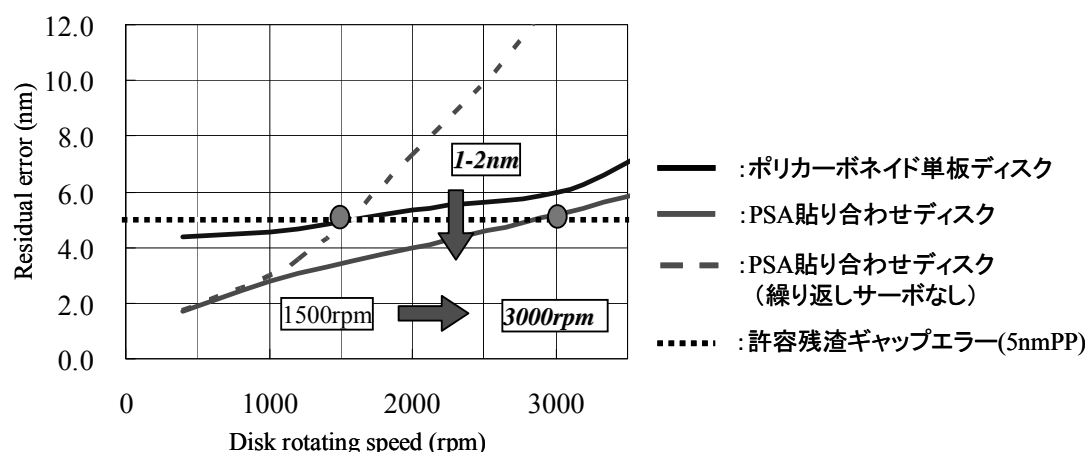


図5.2.4.3 ディスク回転数と残渣ギャップエラー（繰り返しサーボ併用）

図 5.2.4.3 の結果から、ポリカーボネイドディスクの場合は繰り返しサーボを導入することで、図 5.2.4.2 で示した 500rpm であったものが 1500rpm まで回転可能になることがわかる。一方の PSA 貼り合わせディスクの場合は、繰り返しサーボを導入しなくても既に、1500rpm まで回転が可能である。そして、さらに繰り返しサーボを導入することで、ポリカーボネイド単板ディスクの場合と比較して、ギャップエラーが 1~2nm の改善効果が図れることが可能であることがわかる。

結局、PSA 貼り合わせディスクを用いて、帯域 13kHz の高帯域サーボ、及び繰り返しサーボを導入することで、第 3 章 表 3.3.2.1 に示すギャップサーボ目標値（ディスク回転数 3000rpm における許容残渣ギャップエラー 5nmPP 以下）を、より安定して達成できることが実証できた。

また、§ 3.4.5 で述べたように、GES と RF エンベロープ変動とは比例することから、PSA 貼り合わせディスクを用いることで RF エンベロープの改善が期待できる。そこで、ディスク特性改善による RF エンベロープの改善効果について実験した。その結果を図 5.2.4.4 に示す。

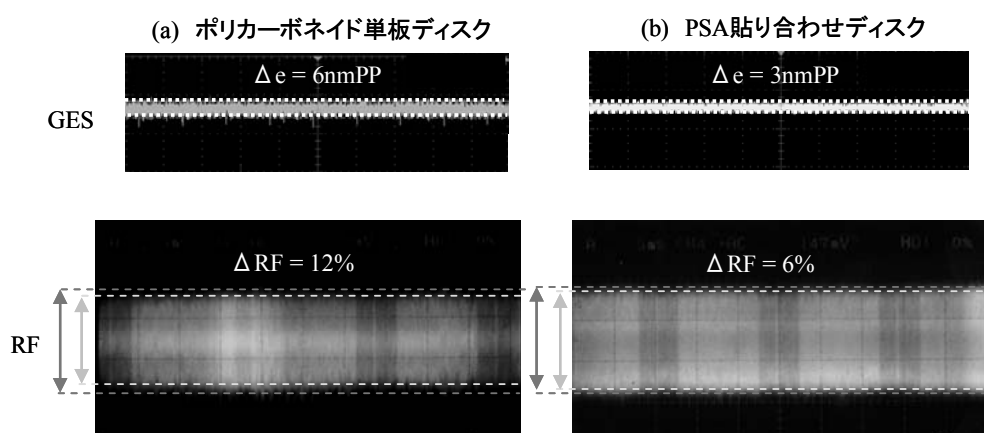


図5.2.4.4 ディスク性能改善によるRF品質改善
(ディスク回転数1300rpm、ディスク面ぶれ20μm)

図 5.2.4.4 より、ディスク基板をポリカーボイド単体から PSA 貼り合わせディスクにすることで、ギャップエラーが 6nmPP から 3nmPP へと 50%の改善に成功している。そして、それに比例して、RF エンベロープ変動についても、12%から 6%へと 50%の改善に成功している。ギャップエラー改善による RF エンベロープ改善効果については、§ 3.4.5 で述べた結果と合致している。

5.2.5 貼り合わせディスクの応用

前節では、PSA 貼り合わせディスクによるギャップエラー改善について述べたが、本節では、PSA 貼り合わせディスクの応用について述べる。PSA 貼り合わせディスクでは、DVD の場合と同様に、ディスクの両面に記録再生面を形成することが可能となる。このように両面ディスク構造とすることで、ギャップ性能が改善できるだけでなく、ディスク容量も倍にすることが可能となる。このような両面ディスク構造にした場合の実験結果を示す。

本実験では、図 5.2.5.1 に示すように、片面 70Gbyte (1-7 変調) の ROM ディスクを PSA により貼り合わせた両面ディスク構造であるディスクを用いた。図 5.2.1 に示すように、両面ともに近接場再生をすることに成功した。

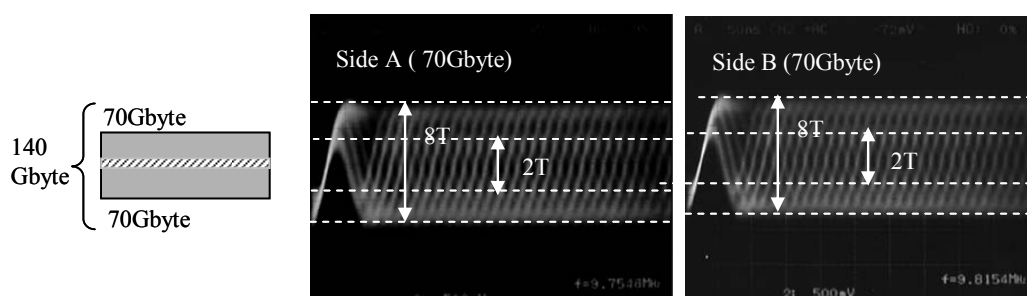


図5.2.5.1 両面ディスクによるRF再生結果 (70Gbyte × 2 = 140Gbyte)

また、各面からの再生 RF 信号から変調度 (最短マーク 2T と最長マーク 8T の RF 信号の比; T : クロック時間幅) を求めて、再生光学系 (レーザー波長 $\lambda=405\text{nm}$ 、開口率 $\text{NA}=1.84$) の変調伝達関数 (Modulation Transfer Function; MTF) [3] と比較した。この結果を図 5.2.5.2 に示す。図 5.2.5.2 より、両面における変調度は、理論値の MTF カーブとほぼ合致している。このことから、図 5.2.5.1 に示すディスク両面による 70Gbyte 相当の RF 信号は $\text{NA}=1.84$ による近接場光再生に成功しており、ディスク両面により総ディスク容量 140Gbyte の近接場光ディスクシステムの実現可能性を実証できた。

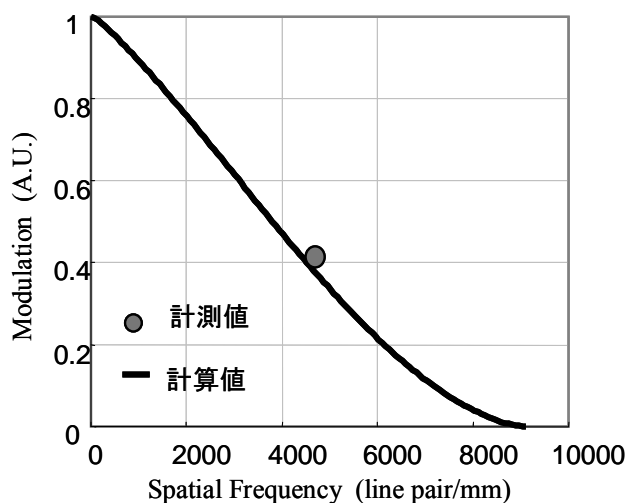


図5.2.5.2 MTF curve ($\text{NA}=1.84$; $\lambda=405\text{nm}$)

5.3 レンズアクチュエーター特性改善化手法[4][5][6]

5.3.1 ピエゾアクチュエーター [4][5]

高精度のギャップサーボの実現のためには、前節に示した外乱源であるディスク特性を改善することでギャップサーボ性能を改善することも重要であるが、ギャップサーボの制御対象であるレンズアクチュエーターの特性を改善することも非常に重要である。

本研究での近接場光ディスクシステムにおいて、当初は、ディスクマスタリング装置用のピエゾを用いたアクチュエーターを用いていた[4]。図 5.3.1.1 に、アクチュエーター構造を示す。

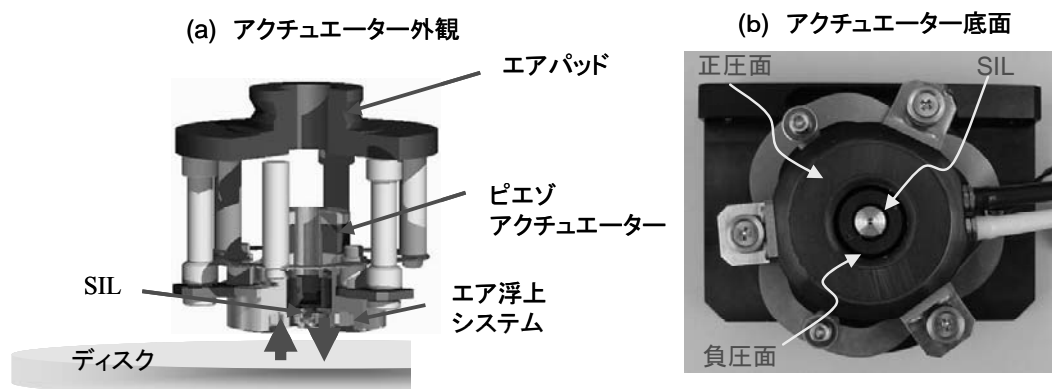


図5.3.1.1 エアパッド式ピエゾ駆動SILアクチュエーター

本アクチュエーターは、ディスク対向面が直径 30mm のエアパッドで接している。エアパッドは、多孔質面からなる正圧面とディスクとエアパッド間のエアを吸引する負圧面からなる。正圧にてアクチュエーターはディスク面上から $16\mu\text{m}$ の高さで浮いている。そして、負圧にてアクチュエーターをディスクに吸着し、最終的に $4.5\mu\text{m}$ の高さでアクチュエーターは空気圧により安定浮上している。また、SIL はエアパッド面から $0.8\mu\text{m}$ 突き出ており、結局、エアパッドによるアクチュエーターの浮上後は、SIL とディスク間の距離は、 $3.7\mu\text{m}$ となっている。SIL は、エアパッド内に設置されている。ピエゾアクチュエーターは 150V で、 $6\mu\text{m}$ のストロークであるものを用いている。

図 5.3.1.2 に、本アクチュエーターによるギャップサーボのブロック図を示す。図 5.3.1.2 に示すように、本システムのギャップサーボは、エアパッドとピエゾアクチュエーターとの 2 段サーボ構造となっている。つまり、エアパッドによりディスク面ぶれに粗く追従し、さらなる高精度の追従は、SIL に設置されたピエゾアクチュエーターにより行う構造となっている。

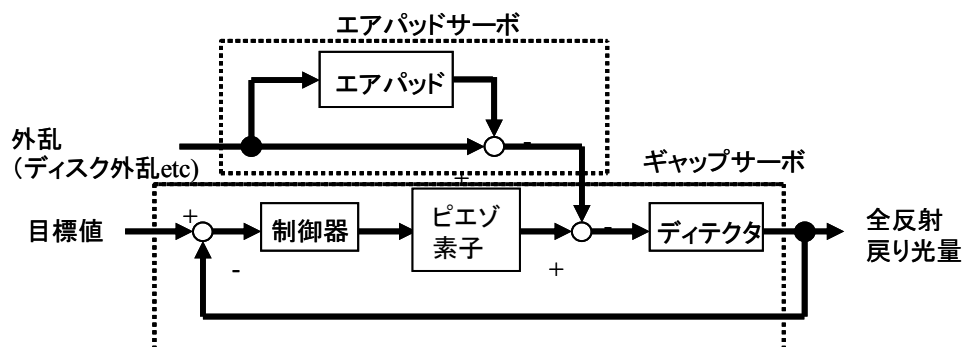


図5.3.1.2 エアパッド式ギャップサーボのブロック図

エアパッド部のモデルを図 5.3.1.3 に示す。

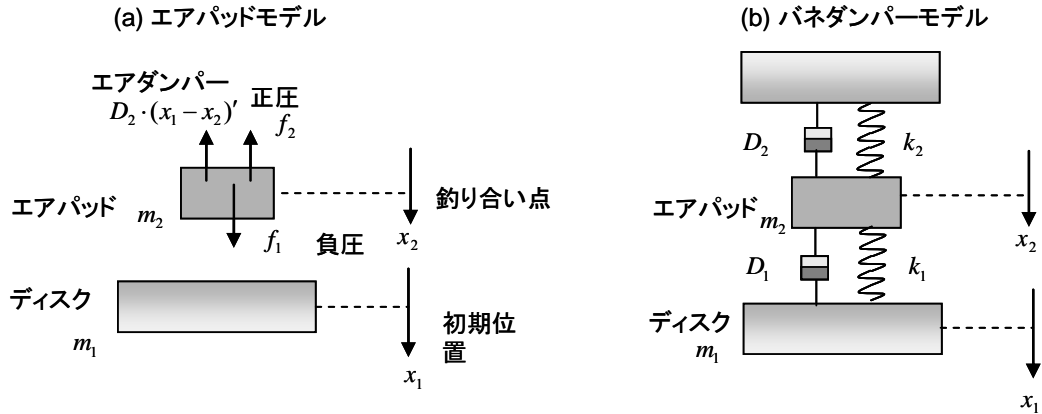


図5.3.2.3 エアパッドのモデル

エアパッドは、正圧、負圧によりバランスが取られて、ディスク上に安定浮上しており、図 5.3.1.3(a)のようにモデル化される。これをバネ、ダンパーにてモデル化すると図 5.3.1.3(b)のようになる。図 5.3.2.3(b)において、エアパッドの伝達関数は、式(5.3.2.1)のようになる。

$$m_2 \cdot x_1'' = D_1 \cdot (x_1' - x_2') + k_1 \cdot (x_1 - x_2) - D_2 \cdot x_2' - k_2 \cdot x_2 \quad \dots\dots\dots (5.3.1.1)$$

ディスク変位とパッド変位との伝達関数 G_{air} を求めるために、式(5.3.2.1)をラプラス変換することにより、式(5.3.2.2)を得る。

$$G_{air}(s) = \frac{X_2(s)}{X_1(s)} = \frac{\frac{D_1}{m_2} s + \frac{k_1}{m_2}}{\frac{1}{m_2} s^2 + \frac{D_1 + D_2}{m_2} s + \frac{k_1 + k_2}{m_2}} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.2)$$

つまり、ディスク変位とエアパッド変位との伝達関数は、ゼロ点を有する 2 次系として表現できる。ディスクを加振し、ディスクとエアパッドに加速度センサを設置して得た結果から実測された $G_{air}(s)$ の周波数特性を図 5.3.1.4 に示す。

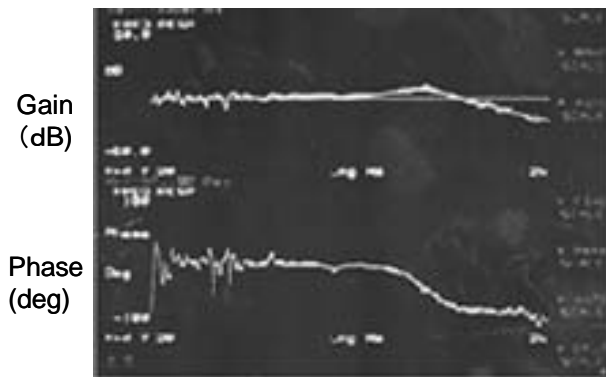


図5.3.1.4 エアパッド伝達関数(実測)

この実測結果に基づき、式(5.3.1.2)で示される伝達関数をフィッティングさせることで、 $G_{air}(s)$ の伝達関数として式(5.3.1.3)を得る。

$$G_{air}(s) = \frac{2.8 \times 10^3 s + 9.2 \times 10^6}{s^2 + 1.7 \times 10^3 s + 9.6 \times 10^6} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.3)$$

従って、図 5.3.1.2 より、面ぶれ外乱とエアパッドの面ぶれ外乱との伝達関数、つまり、エアパッドサーボの伝達関数 $G_{as}(s)$ は、式(5.3.1.4)のようになる。

$$G_{as}(s) = 1 - G_{air}(s) = \frac{s^2 - 1.1 \times 10^3 s}{s^2 + 1.7 \times 10^3 s + 9.6 \times 10^6} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.4)$$

式(5.3.1.4)より、エアパッドサーボの周波数特性は図 5.3.2.5 のようになる。

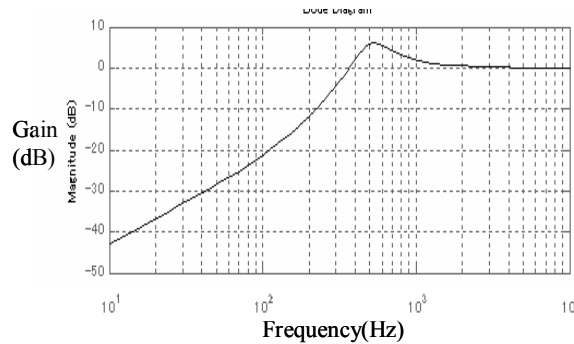


図5.3.2.5 エアパッドサーボの周波数特性(シミュレーション)

一方、SIL を組み込んだ状態でのエアパッド内のピエゾアクチュエーターの周波数特性を実測した結果、図 5.3.1.6 に示す。

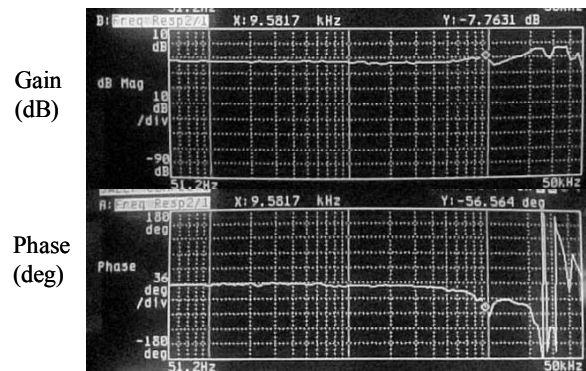


図5.3.2.6 SIL組み込みピエゾアクチュエーターの周波数特性

図 5.3.1.6 の結果に基づき、1 次共振周波数が 9.5kHz であり、そのときのゲインが 4dB であることから、SIL を組み込んだピエゾアクチュエーターを 2 次系でモデル化すると、式 (5.3.1.5) のようになる。

$$G_{PZT}(s) = \frac{3.56 \times 10^9}{s^2 + 3.8 \times 10^4 s + 3.56 \times 10^9} \quad \dots\dots\dots (5.3.1.5)$$

9.5kHz の 1 次共振の影響を回避するようにサーボフィルタを設計し、開発したギャップサーボの周波数特性を図 5.3.1.7 に示す。

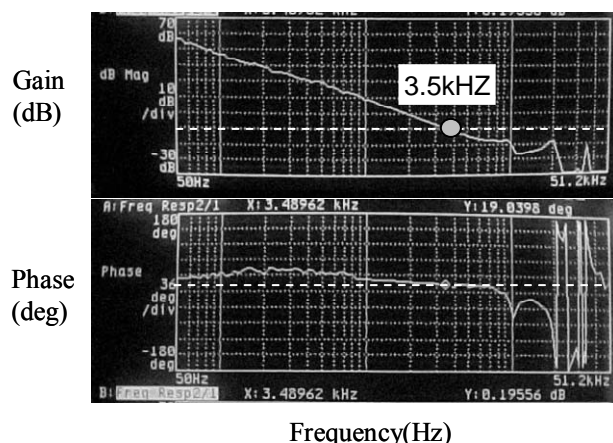


図5.3.1.7 ピエゾ駆動ギャップサーボの周波数特性(実測)

図 5.3.1.7 に示すように、サーボ帯域が 3.5kHz、位相マージンは 23deg、ゲインマージンは 7dB であった。

しかしながら、近接場光ディスクシステムにおいて、必要とされるギャップサーボ帯域は § 3.3.3 に示すように 7.7kHz 以上であり、本アクチュエーターでは、SIL を組み込んだピエゾアクチュエーターの 1 次共振(9.5kHz)が阻害要因となり、これ以上の高帯域化は困難である。

なお、ピエゾ素子単体での 1 次共振は 45kHz 程度であった。つまり、SIL を組み込むことで 9.5kHz まで低域化してしまっている。これは、SIL 及び SIL をエアパッドへの組み込み用治具によりアクチュエーター重量が 65g にもなり、後述のボイスコイルアクチュエーターと比較してヘッド重量が重くなってしまっていることが一因である。また、§ 5.3.1 で述べたように、本アクチュエーターは直径 30mm でディスク面と対向しており、いわば面で接している。このため、理論的に 30mm 以下の面ぶれ周期には追従できない。このため、理想的には図 5.3.1.5 に示すように 350Hz 程度までエアパッドは面ぶれに追従できるが、実際には 100Hz 程度が限界となる。この他、ディスクとの対向面が大きいことから、ディスク面に対するヘッドのアクセス半径が通常の光ディスクのアクセス半径よりも制限されてしまうことも問題である。さらに、ピエゾ素子自体の可動ストローク範囲が 6μm しかないことから、エアパッドにより 6μm 以下に抑制する必要があるが、ピエゾ素子のストローク範囲外となり、エアパッドでは抑制不足でピエゾアクチュエーターによるギャップサーボが不可能である場合があった。以上のことから、エアパッド式ピエゾアクチュエーターに代わるアクチュエーターが必要とされた。

5.3.2 2 軸アクチュエーター[6][7]

エアパッドとピエゾアクチュエーターでは高帯域化が困難であり、必要とされるサーボ帯域が達成困難であることから、従来の光ディスクと同様にボイスコイルモーター (Voice Coil Motor; VCM) 型アクチュエーターを用いることを検討した。

VCM アクチュエーターでは、DC 感度、AC 感度、1 次共振周波数、1 次共振の Q 値 (減衰係数 ζ)、2 次以上の高次共振周波数の重要な要素となる。VCM アクチュエーターは、§ 3.4.2 で述べたように 2 次系モデルで表現できる。一次共振周波数以下のゲインが一定な周波数における感度を DC 感度 S_L と呼び、単位は、mm/V で表現される。例えば、10Hz における値で規定される。アクチュエーターの周波数特性における -40dB/dec での感度を AC 感度と呼び、単位は重力加速度 $G=9.8m/s^2$ で規格化され、単位は、G/V で表現される。例えば、1kHz における値で規定される。これらの要素に対する開発目標は以下の通りである。

① 1次共振

一次共振周波数が低いとアクチュエーターの剛性が小さくなり、外乱に弱くなる。一方、高くなると、サーボのDCゲインが確保しにくくなる。通常は、アクチュエーターの共振周波数をディスク回転一次成分近傍になるようにし、アクチュエーターの共振を利用してDCゲインを確保するようにする。そこで、本論では、目標ディスク回転数を3000rpmとしていることから、1次共振を50Hz程度となることを目標とした。

② 高次共振

2次以上の高次共振はサーボ帯域に近いと、共振によりサーボが不安定になり、サーボ後のギャップエラーに高次共振による発振が重畳し、安定性が損なわれる。このため、高次共振周波数でサーボ帯域が制限されてしまう。そこで、高次共振周波数はサーボ帯域より十分に高いことが望ましい。本研究ではサーボ帯域として10kHz以上確保したいことから、高次共振周波数としては、存在しても少なくとも5倍である50kHz以上に存在し、かつ共振ピークも低くすることを目標とした。

③ 減衰係数 ζ

一般的に、減衰係数が大きいほどアクチュエーターは非振動的になるが応答性が悪くなる。逆に小さくなると振動的になるが応答性は良くなる。そこで、本研究では、これらを考慮して、0.1~0.2程度を開発目標とした。

④ DC感度

DC感度が大きいほどDA出力に敏感になる傾向がありブルイン速度も速くなる傾向がある。一方で、リミットサイクルとなり不安定動作になる傾向がある。DC感度は、VCMアクチュエーターのコイル材質、巻き数、固定磁石の磁力等で決まる。リミットサイクルの防止、ブルイン速度の観点から、本研究では、DAビット数を16bitとし、DC感度を0.5~1.0mm/Vとすることを開発目標とした。

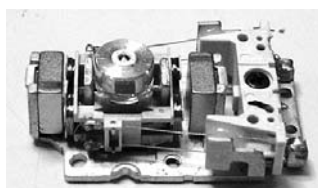
⑤ AC感度

AC感度が大きいほど、消費電力、コイル経が小さくなることに伴うヘッド重量の軽量化が可能となる。AC感度も、VCMアクチュエーターのコイル材質、巻き数、固定磁石の磁力等で決まる。本研究では、DVDのアクチュエーターと同程度の8~9G/Vとすることを開発目標とした。

以上を①~⑤の項目を評価項目として、これらの目標値を達成するようにアクチュエーターの開発を進めた。

当初の検討では、入手性、開発容易性を考慮して、ゲーム機(Play Station™)に用いられているVCMアクチュエーターを改造し、SILをマウントして用いた。また、SILとして直径2mmのものを用いた。図5.3.3.1に、本アクチュエーター(以下、第1世代アクチュエーターと呼ぶ)の外観、主要なメカ特性、周波数特性を示す。なお、周波数特性は、§3.4.2で述べた電圧ドライブにて測定した結果である。このため、高域部において位相が遅れているが、実際のドライブは電流ドライブであることから、高域部での位相の遅れはない。これは、以下同様である[6]。

(a) アクチュエーター外観



(b) 主要メカ特性

	Axis	
	Gap	Tk
ω_0	104	212
ζ	0.15	0.15
S_L (mm/V)	3.52	0.70
S_H (G/V)	3.47	2.83

図5.3.2.1-1 第一世代アクチュエーター

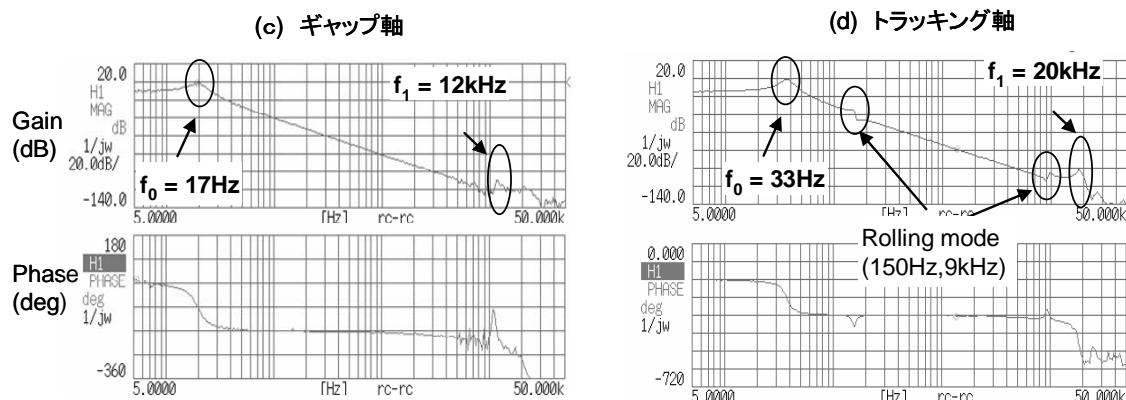


図5.3.2.1-2 第一世代アクチュエーター

また、本アクチュエーターを用いて開発されたギャップサーボ周波数特性（実測）を図 5.3.2.2 に示す。

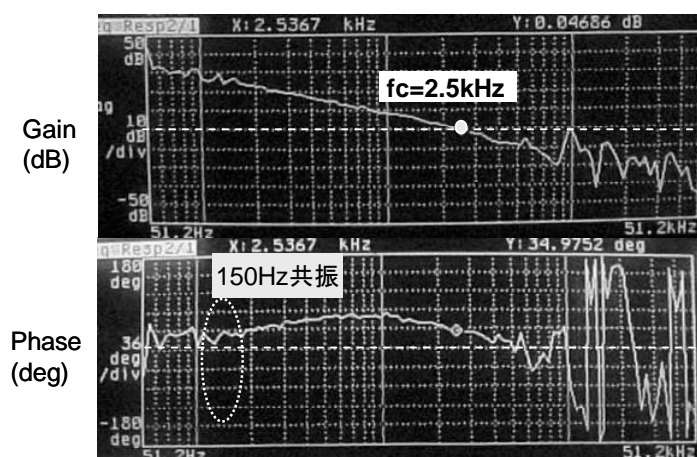


図5.3.2.2 第一世代アクチュエーターによるギャップサーボ周波数特性(実測)

第一世代アクチュエーターについて、①～⑤の評価項目に関して、特に本研究テーマであるギャップ軸に着目して検討する。①1次共振については、目標値より低く 17Hz である。このため、ギャップサーボ帯域は、2.5kHz しかないが、DC ゲインの確保には貢献すると考えられる。しかし、剛性が小さく改善の余地がある。②高次共振については、12kHz に 2 次共振があり、このためにギャップサーボ帯域が制限され、結果としてギャップサーボ帯域が 2.5kHz までしか上げられず、§ 3.3.3 で示したギャップサーボ帯域の要求を満足することができなかった。2 次共振が 12kHz と低域化しているのは、レンズを含む可動部の総重量が 800mg あり、ヘッド部が重いことが一因である。③減衰係数は満足しているが、④DC 感度は仕様値より大きく、この点も制御しにくい制御対象となっている。⑤AC 感度は、さらに大きい方が望ましい。

この他、第一世代アクチュエーターには、トラッキング軸の 150Hz にローリングモードの影響があり、位相が反転している。ローリングモードとは、レンズ重心とコイル部である可動部重心の不一致により生じるねじれによる共振である[8]。第一世代アクチュエーターによるギャップサーボでは、ギャップサーボにトラッキングローリングモード共振がドライブクロストークにより影響し、150Hz 振動が GES に重畳する問題点があった。これは、共振部位相が反転位相であり、また、共

振周波数である150Hzにおけるギャップサーボゲインは20dB程度しかないために抑制しきれないためであると考えられる。図 5.2.2.3 に示すギャップサーボ周波数特性にも 150Hz の共振の影響が確認できる。図 5.3.2.3 に、第一世代アクチュエーターによるギャップサーボの様子を示す。この実験では、ディスク回転数が 300rpm であるが、150Hz 共振の影響を強く受け、さらなる高回転でのギャップサーボは困難であった。

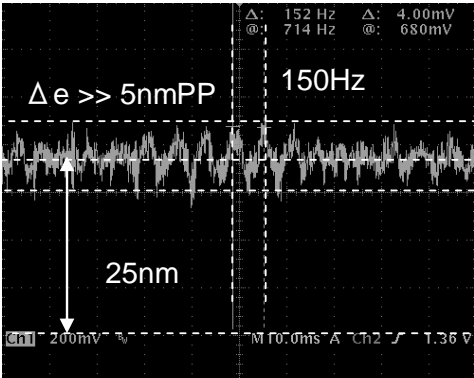


図5.3.3.3 トラッキング軸共振によるギャップサーボへの影響 (300rpm)

以上のように、第一世代アクチュエーター、特に、12kHz の 2 次共振のよるギャップサーボ帯域制限、トラッキング軸共振によるギャップサーボ品質の悪化が特に問題であった。そこで、これらを改善するためにアクチュエーターの改善を図った。

図 5.3.2.4 に、第二世代アクチュエーターの外観、主要なメカ特性、周波数特性を示す[5]。

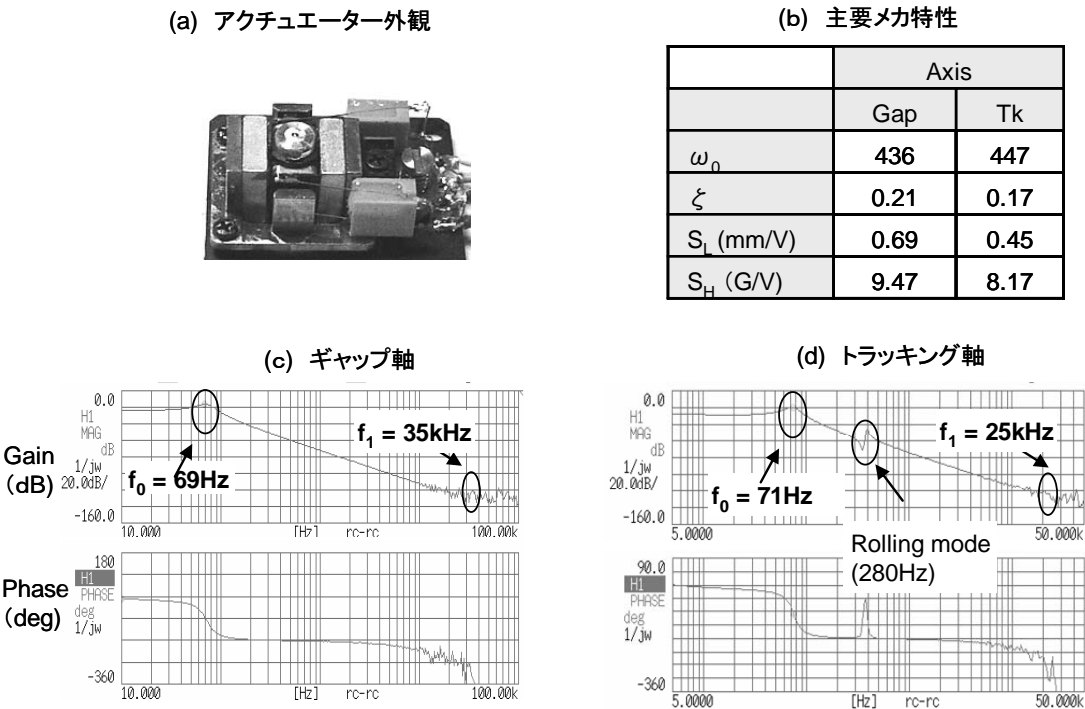


図5.3.2.4 第二世代アクチュエーター

また、本アクチュエーターを用いて開発されたギャップサーボの周波数特性(実測)を図 5.3.2.5 に示す。

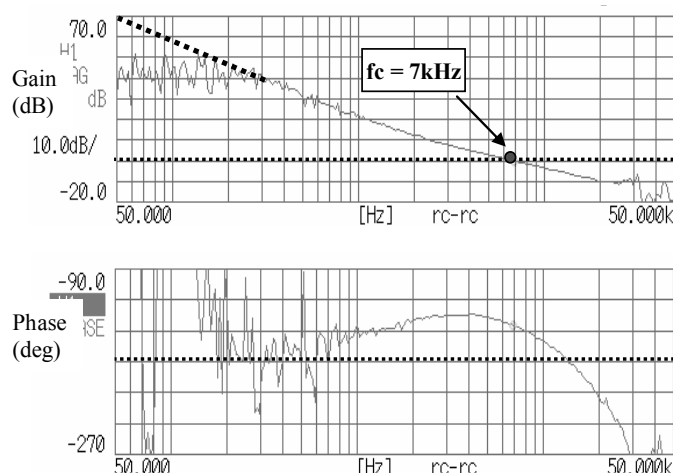


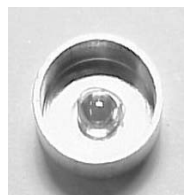
図5.3.2.5 第二世代アクチュエーターによるギャップサーボ周波数特性

第二世代アクチュエーターについて、①～⑤の評価項目に関して検討する。① 1次共振については69Hzであり仕様を満足しており、また剛性も高くなっている。② 2次共振が12kHzから35kHzへの高域化することに成功している。このことは、ギャップサーボ帯域を2.5kHzから7kHzに高帯域化することに貢献している。この二次共振の高帯域化は、図5.3.2.6に示すようにSILを直径2mmのものから1mmのものに設計変更することで、SILを含む可動部の総重量が800mgから400mg程度に軽量化したことが一因である。そこで、第二世代以降は、直径1mmのSILを標準として用いている。なお、これ以上の小型化は、SIL加工時の取り扱いのしにくさから困難であった。

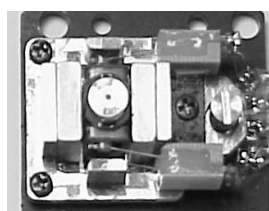
(a) 第1世代ピックアップ



(b) SIL (φ 1mm)



(c) 第2世代ピックアップ



(d) SIL (φ 2mm)



図5.3.2.6 SILの小型化

③減衰係数、④DC感度、⑤AC感度は共に、ほぼ満足している。この他、第二世代アクチュエーターには、第一世代アクチュエーターと同様にトラッキング軸において、280Hzにローリングモード共振が存在する。しかしながら、この共振は位相進みであることから、実験においてはこの共振によるギャップサーボへの悪影響は認められなかった。図5.3.2.7にギャップサーボを適用した結

果の一例を示す。

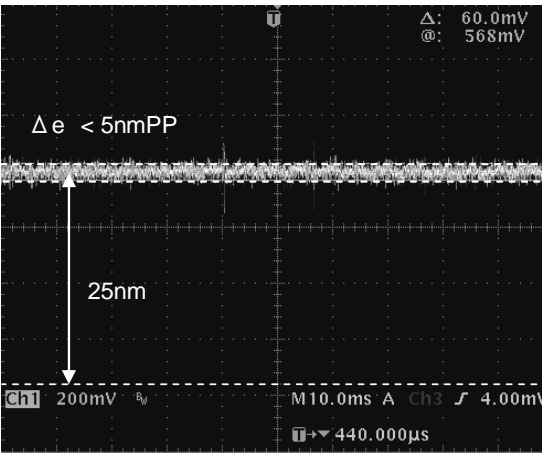


図5.3.2.7 第2世代アクチュエーターによるギャップサーボ改善結果（1200rpm）

図 5.3.2.3 と図 5.3.2.7 を比較すると、アクチュエーターによるギャップサーボの改善効果は明確である。第二世代アクチュエーターでは、ディスク回転数が 1200rpm にもかかわらず、ギャップサーボ特性は大きく改善することに成功している。これは、ギャップサーボ帯域が高域化したことと、トラッキング軸のローリングモード共振の影響がないことが要因であると考えられる。

しかしながら、第二世代アクチュエーターには問題点がある。図 5.3.2.4 のアクチュエーターの周波数特性において、ギャップ軸、トラッキング軸が共に、20kHz 以上で大きく位相が回ってしまっている。このため、図 5.3.2.5 に示すように、7kHz までの高帯域化には成功したが、これ以上の高帯域化は困難であった。そこで、第二世代アクチュエーターの性能を損なうことなく、高帯域化を達成するために高次共振の位相周りを改善することを開発目標として、第三世代アクチュエーターを開発した。

図 5.3.2.8 に、第三世代アクチュエーターの外観、主要なメカ特性、周波数特性を示す[7]。

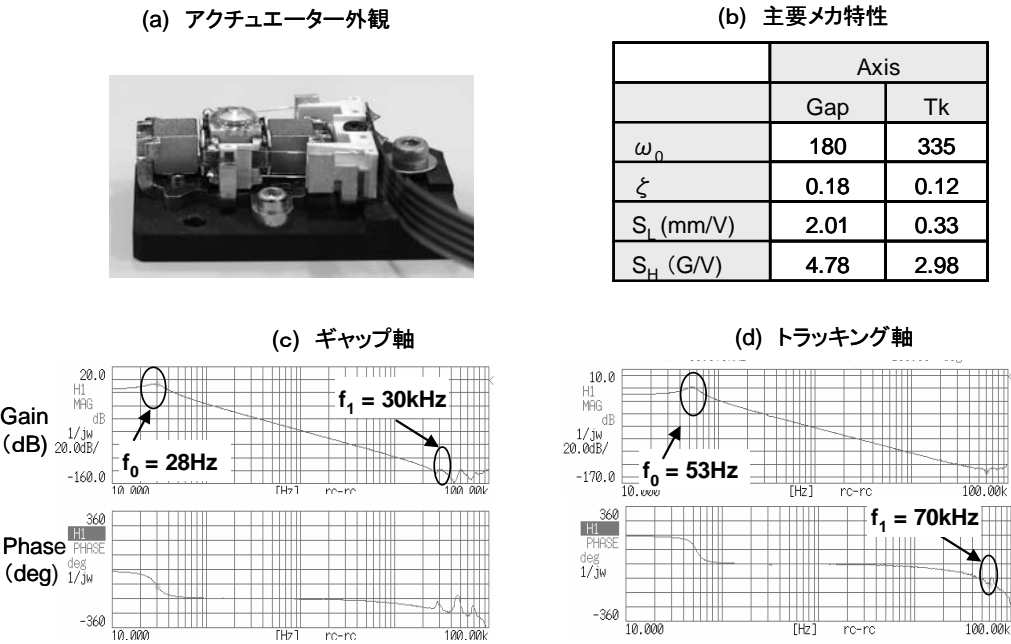


図5.3.2.8 第三世代アクチュエーター

第三世代アクチュエーターは、本研究で主に用いたもので、本アクチュエーターによるギャップサーボ周波数特性は第3章 § 3.4.5 図 3.4.5.1、§ 3.4.7 図 3.4.7.8 に示すようである。本アクチュエーターは、放送局向けの取材カメラである Blu-ray システム技術を用いた XDCAM システム用の VCM アクチュエーターを改造し、SIL をマウントしたものである。

①～⑤の評価項目について検討する。① 1 次共振については 28Hz であり、第一世代と第二世代の中間の周波数であり、仕様である 50Hz 程度を満足していないが、高域でのゲインの確保のしやすさ、剛性の点からは、歴代のアクチュエーターでは一番バランスが取れていると思われる。②高次共振については、第二世代と同程度の 30kHz へと高域化しつつ、第二世代では問題となっていた位相の周りの問題が解消されており、高帯域化に貢献している。これは、第二世代アクチュエーターと同様に直径 1mm の SIL を用いており、SIL を含む可動部の総重量が 450mg と軽量化していることが一因である。③減衰係数は、ほぼ仕様を満足している。④DC 感度、⑤AC 感度については、仕様を満足していないが、第一世代と第二世代の中間の値は実現しており、他の特性とのバランスを考慮して問題なしとした。この他、第三世代アクチュエーターには、過去の世代のアクチュエーターと異なり、トラッキング軸においてローリングモード共振は存在しないことが特徴である。このため、トラッキング軸からのドライブクロストークの問題はなく、ギャップ軸の動特性はギャップ軸の動特性のみで決まるシステムとなっている。

図 5.3.2.8 のギャップ軸の周波数特性より、30kHz、50kHz、70kHz、85kHz に高次共振がみられるが、§ 3.4.7 で述べたように 85kHz 以外の高次共振については問題なく、85kHz の位相反転の共振部については、ノッチフィルターにより共振の影響を抑制することで、最終的に図 3.4.7.8 に示すように、ギャップサーボ帯域を 13kHz まで安定に確保することに成功した。その結果、本アクチュエーターによりディスク回転数 3000rpm、面ぶれ量 40 μ m のディスクに対して、5nm P P 精度でのギャップサーボ性能を達成することができた。

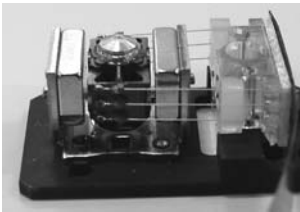
5.3.3 3 軸アクチュエーター[9][10]

前節では、2 軸アクチュエーターでの動特性改善、及びそれに基づくギャップサーボ改善について述べた。このような 2 軸アクチュエーターによるギャップサーボの改善を行う一方で、第 4 章で述べたようにチルトサーボの導入に伴い 3 軸アクチュエーターを導入した。本節では、3 軸アクチュエーターの動特性について述べる。

3 軸アクチュエーターによる動特性については、前節で述べた第三世代アクチュエーターの動特性と同程度もしくはそれ以上を実現し、かつ第三世代アクチュエーターで達成した 13kHz のギャップサーボ帯域を同様に実現することを開発目標とした。本節では、3 軸アクチュエーターを第四世代アクチュエーターと呼ぶことにする。

図 5.3.3.1 に、第三世代アクチュエーターの外観、主要なメカ特性、周波数特性を示す。

(a) アクチュエーター外観



(b) 主要メカ特性

	Axis	
	Gap	Tk
ω_n	360	333
ζ	0.13	0.12
S_l (mm/V)	1.33	0.72
S_H (G/V)	10.37	7.28

図5.3.3.1-1 第四世代アクチュエーター

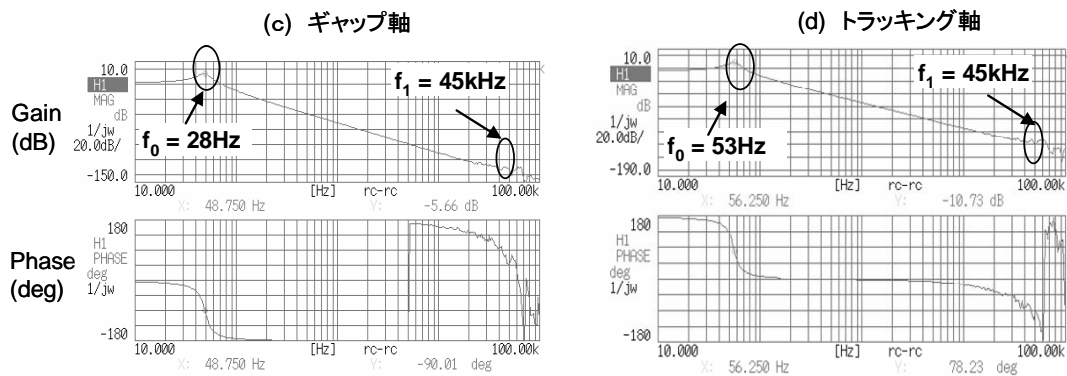


図5.3.3.1-2 第四世代アクチュエーター

第四世代アクチュエーターは、チルトサーボにおいて用いたもので、本アクチュエーターによるギャップサーボ周波数特性は第4章 §4.6 図4.6.3に示す通りである。

第四世代アクチュエーターは、入手しやすいDVD用のVCMアクチュエーターを改造し、SILをマウントしたものであり、図5.3.3.1(a)に示すように、ギャップ軸、トラッキング軸、チルト軸の可動ワイヤが3本備えていることがわかる。これが、2軸アクチュエーターとの大きな違いである。

①～⑤の評価項目について検討する。①第一次共振については57Hzであり、仕様である50Hzをほぼ満足している。なお、トラッキング軸についても53Hzであり仕様を満足している。②高次共振については、ギャップ軸、トラッキング軸ともに45kHz以上であり、また共振ピークゲインも歴代アクチュエーターの中では小さい。③減衰係数についても、ほぼ仕様を満足している。④DC感度、⑤AC感度についても、仕様をほぼ満足している。この他、第三世代アクチュエーターと同様に、ギャップ軸のみならずトラッキング軸においてローリングモード共振は存在しないことが特徴である。

以上のように、歴代のアクチュエーターでは最も仕様に合致したアクチュエーターであるといえる。

本アクチュエーターによるギャップサーボについては、第4章 §4.6で述べた通りである。第三世代アクチュエーターと異なり、高次共振のゲインが小さくまた位相も同相であることから、特にノッチフィルターを導入しなくても第三世代アクチュエーターと同様に、ギャップサーボ帯域の13kHz化に成功している。

5.4 スピンドルモーター特性改善手法

5.4.1 スピンドルモーターによるギャップサーボへの影響

ナノ精度でのギャップサーボ性能を要求する近接場光ディスクシステムにおいて、スピンドルモーターの性能も重要となる。

光ディスクシステムでは、ディスクをスピンドルモーターにクランパーと呼ばれる固定部により設置し、回転させる。このため、スピンドルモーター自身の振動が大きいと、その振動により §5.2で述べたようなディスク面の共振が励起されてギャップサーボ性能が悪化してしまう。例えば、従来の光ディスク検査用システムで用いられているボールベアリングモーターを用いた場合のギャップサーボ結果を図5.4.1.1に示す。

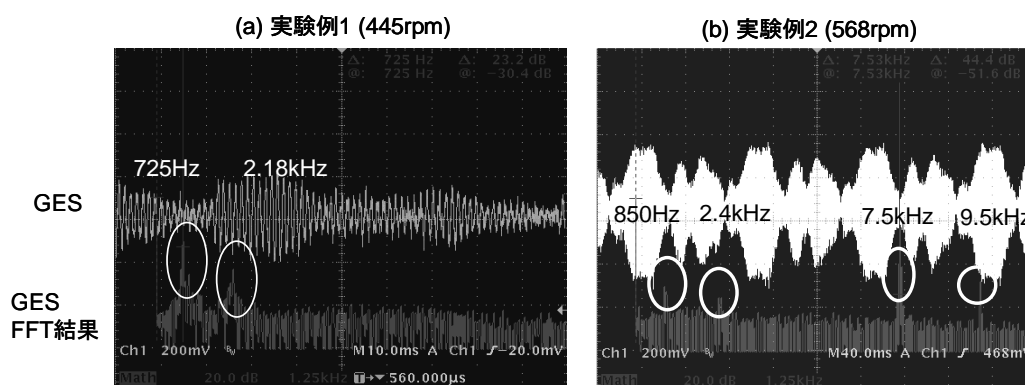


図5.4.1.1 モーター加振によるギャップサーボへの影響

この実験で用いたスピンドルモーターは、DC ブラシレスモーターであり、非繰り返し性の振れ (Non Repetitive Run-out; NRRO)成分は特に規定されていなかったが、繰り返し性のある振れ (Repetitive Run-out; RRO)成分は $3\mu\text{m}$ 以下のものである。従来の光ディスクシステムでは何ら問題ないものであるが、ナノ精度を要求するギャップサーボシステムでは致命的な問題を引き起こしていることがわかる。つまり、図 5.4.1.1(a)、(b) に示すように、445rpm または 568rpm の低回転数時でも、GES が振動的となっており、ナノギャップを維持するが困難になっている。このギャップエラーの振動周波数を FFT により調べると、725Hz、2.18kHz、もしくは 850Hz、2.4kHz、7.5kHz、9.5kHz となっている。§ 5.1 で述べたようにこれらはディスク面共振であると考えられる。つまり、ボールベアリングによるモーター軸の加振によりディスク面共振が引き起こされていることが原因であると考えられる。

以上のようなことから、ディスク共振を励起させないためにも、スピンドルモーター自身の振動が少ないものが望ましい。このためには、まず、現状のボールベアリングの精度を高めボールによる回転軸加振の影響を低減することである。あるいは、ベアリング構造を変更して、例えば、軸受けとして流体を用いることで回転軸と移動動力部との摩擦を低減させることである。しかしながら、後者において動圧軸受けタイプの場合、ある程度以上の回転数以上でないと流体の効果が得られにくく、また、回転数が一定であることが前提である。このため、第 4 章 § 4.4 で示した近接場光ディスクシステム仕様にあるような線速度一定で回転数が半径依存して変化するシステムには不向きである。一方、前者の静圧タイプの場合でも、外部に加圧する機構必要となるためスピンドルモーター自体が大型化してしまう。以上のことから、本研究ではベアリング構造を変更する手法は採用せず、ボールベアリングを高精度化する手法を採用した。そして、RRO の条件を厳しくし、かつ NRRO の条件も規定するようにした。また、クランプ後のディスク面ぶれ量が小さいほどギャップサーボ上は有利であることから、スピンドルモーターにディスクを設置するクランプ面での面ぶれも規定するようにした。

5.4.2 近接場光ディスクシステム用スピンドルモーター

表 5.4.2.1 に、近接場光ディスクシステム用スピンドルモーターの仕様を示す。

スピンドルモーターのギャップ軸、トラッキング軸の RRO は共に、 $1.0\mu\text{m}$ 以下としている。また、NRRO は $0.1\mu\text{m}$ 以下としている。クランプ部分の振れは、ギャップ方向が $1\mu\text{m}$ 以下、トラッキング軸方向については、クランプ部をテーパ構造とすることで、ディスクとクランプ部のクリアランスをゼロとした。そして、ギャップ軸、トラッキング軸ともに、ディスクをクランプした状態にて、 $40\mu\text{m}$ 以下になることとした。これは、§ 3.3.2 に示すサーボ仕様に基づくものである。

表5.4.2.1 近接場光ディスクシステム用スピンドルモーター仕様

スピンドル	Axial (μm)	RRO	< 1.0
		NRRO	<0.1
	Radial (μm)	RRO	< 1.0
		NRRO	<0.1
クランプ	Run-out	Axial (μm)	<1.0
		Radial (μm)	0.0

表 5.4.2.1 の仕様に基づいて開発した近接場用光ディスクシステムのスピンドルモーターの外観を図 5.4.2.1 に示す。

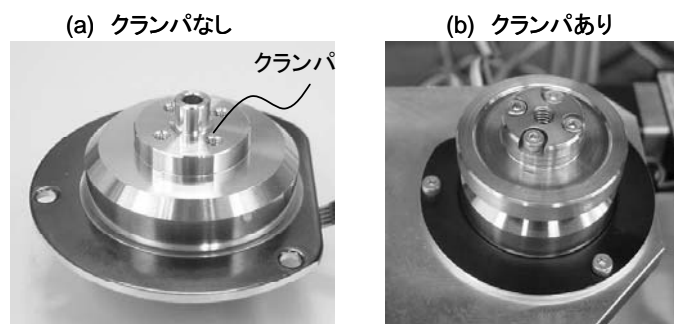


図5.4.2.1 近接場光ディスク用スピンドルモーター外観

本スピンドルモーターは、ハードディスク用の高精度ボールベアリングをもとに、表 5.4.2.1 に示した仕様を満足するようにチューニングしたものである。

ギャップ軸の面ぶれ量については、次式で表せる。

$$\text{面ぶれ} = \text{モーター軸振れを含むクランプ面の振れ} + \text{クランプ上のダストによる振れ} + \text{メディア表面自身の歪み} \quad (5.4.2.1)$$

第1項については、クランプ面による振れ調整により $1\mu\text{m}$ 以下となっており、表 5.4.2.1 の仕様を満足している。第2項、第3項についてはディスク依存のところがある。そこで、複数のディスクに対して面ぶれを測定して確認した。その結果、実測値として $32\mu\text{m}$ 、偏差量 $3.2\mu\text{m}$ であった。この結果から、面ぶれ量が $40\mu\text{m}$ 以下であるというサーボ仕様を満足していることがわかった。

また、トラッキング軸の偏芯については、次式で表せる。

$$\text{偏芯} = \text{クランプのクリアランス} + \text{クランプを含む軸ぶれ} + \text{メディア偏芯} \quad (5.4.2.2)$$

第1項については、クランプ部をテーパ型とすることでゼロとなっており、表 5.4.2.1 の仕様を満足している。第2項については、実測して $10\mu\text{m}$ 以下であった。第3項についてはディスク依存のところがある。そこで、複数のディスクに対して偏芯を実測した。その結果、実測値として $33\mu\text{m}$ 、偏差量 $3.8\mu\text{m}$ であった。この結果から、偏芯量が $40\mu\text{m}$ 以下であるというサーボ仕様を満足していることがわかった。

5.4.3 スピンドルモーター改善による効果

図 5.4.3.1 に近接場光ディスク用スピンドルモーター、及び、従来の光ディスク検査用の高精度スピンドルモーターの場合において、3600rpm におけるディスク面ぶれの FFT 結果、及び、§ 5.2 で述べた実験と同様に、ディスクを 3600rpm で回転後に、モーター印加電圧を切つてゼロにし、静止状態まで変化させたときのディスク面ぶれをレーザードップラー計にて計測した結果を示す。また、図 5.4.3.2 に拡大したものを示す。

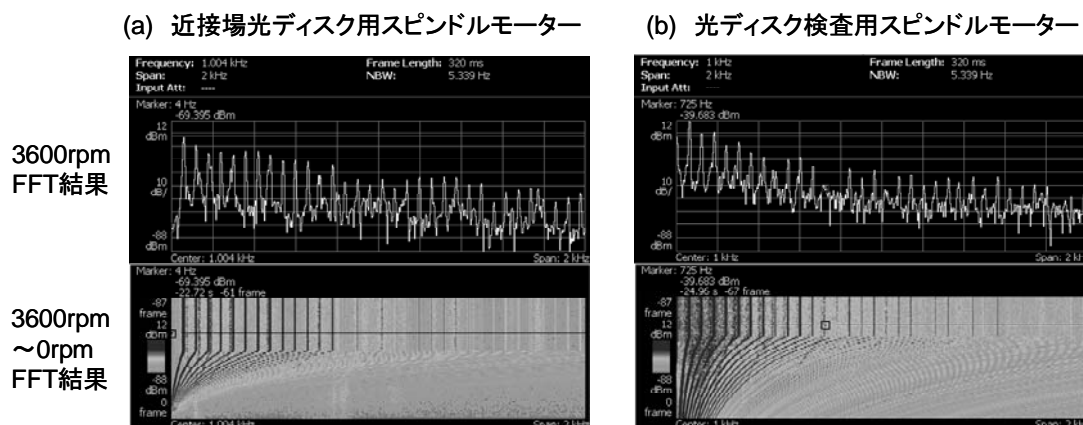


図5.4.3.1 スピンドルモーターによるディスク面振動の改善

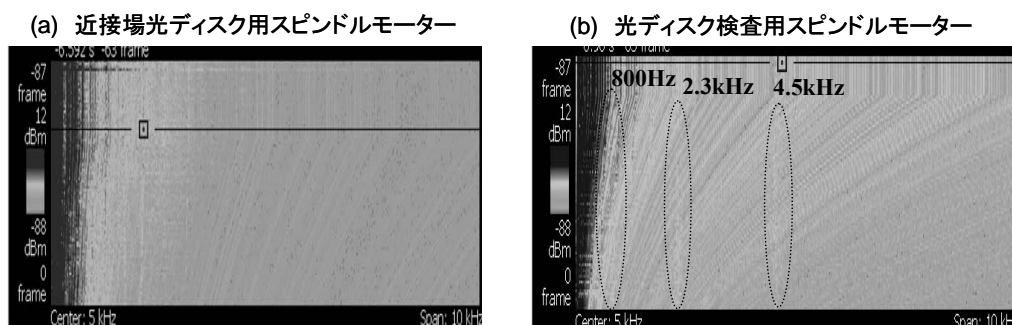


図5.4.3.2 スピンドルモーターによるディスク面共振の抑制

図 5.4.3.1(a)、(b) を比較すると、近接場光ディスク用スピンドルモーターの場合は、全体的にディスク面振動レベルが低く、ディスク共振レベルが低いことがわかる。このことは、3600rpm での FFT 結果の比較において、振動パワーの DC レベルが低くなっていることからわかる。一方、従来の光ディスク検査用スピンドルモーターの場合は、ディスク振動レベル高く、明確に観察されることがわかる。また、図 5.4.3.2 において、本実験の半径では、近接場光ディスク用スピンドルモーターの場合は § 5.2 で述べたディスク共振の影響は明確には観察されないレベルであるのに対して、従来の光ディスク検査用スピンドルモーターの場合は、ディスク面が強く加振されている結果としてディスク共振周波数が明らかに観察されている。以上のことから、スピンドルモーターの低振動化に成功していることがわかる。

図 5.4.3.3 にスピンドルモーターによるギャップサーボ品質の改善結果を示す。

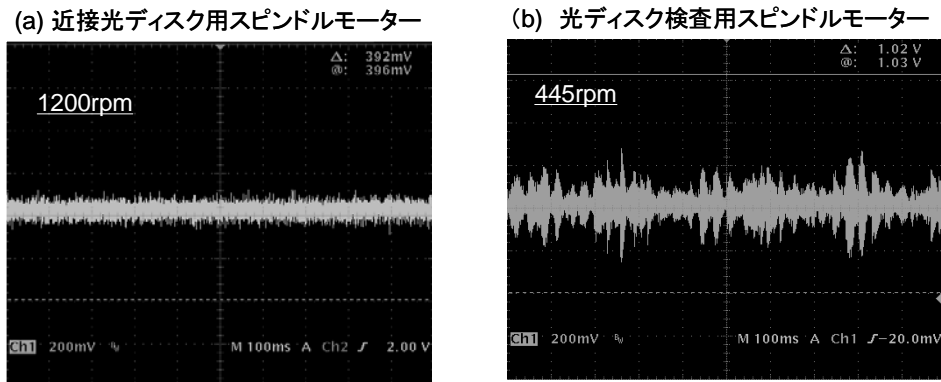


図5.4.3.3 スピンドルモーターによるギャップサーボ品質の改善結果

図 5.4.3.3(a)と(b)を比較すると、近接場光ディスク用スピンドルモーターの場合は 1200rpm での結果であり、従来のスピンドルモーターでの実験よりもディスク回転数が約 3 倍程度高速であるのに対して、むしろギャップサーボ性能は優れている。一方の従来の光ディスク検査用スピンドルモーターの場合は、スピンドルモーターによる加振が強いためにディスク面が振動し、445rpm と低速回転にもかかわらずギャップサーボ品質が悪化している。

このようにスピンドルモーターの動特性を改善することによる手法も、ギャップサーボ品質の改善に対しては重要であり、かつ効果的である。

5.5 まとめ

本章では、コンポーネント性能を改善する手法によるナノギャップ高精度化技術について述べた。そして、コンポーネントとして、ナノギャップサーボに直接的に影響を及ぼす、制御対象であるレンズアクチュエーター、外乱源であるディスク、スピンドルモーターの 3 点に着目し、これらのコンポーネント改善による手法について述べた。

ディスク性能のナノギャップ高精度化手法においては、従来の光ディスクシステムでは問題となっていなかったディスク共振の問題が顕在化し、ギャップ性能に影響を及ぼすことを明らかにした。そこで、ディスクのダンピング性能に着目し、ダンピング性能を高めたディスクを採用する手法を開発した。その結果、開発されたダンピング性能を高めたディスク（高ダンピングディスク）によりギャップサーボ性能の改善が図れることを明らかにした。従来のポリカーボネード基板を用いた場合は、許容残渣ギャップエラー量が 5nmPP とした場合、ディスク共振半径ではディスク回転数が 500rpm までしか許容できなかったのに対して、高ダンピングディスク基板では 1500rpm まで可能であり、さらに繰り返しサーボにより最終的にディスク全面で 5nmPP を達成できることを明らかにした。また、高ダンピングディスク基板による両面ディスク構造を用いた近接場光ディスクを開発し、ギャップサーボ性能を高めつつディスク容量を大容量化できることを示した。

レンズアクチュエーターによるナノギャップ高精度化手法では、① 1 次共振が 50Hz、② 高次共振が 50kHz 以上に存在し、かつ共振ピークも低くすること、③ 減衰係数 ζ が 0.1~0.2、④ DC 感度が 0.5~1.0mm/V、⑤ AC 感度が 8~9G/V とすることを開発目標とし、これらの仕様を満足する 2 軸または 3 軸アクチュエーターを開発した。そして、アクチュエーターの動特性改善により、ナノギャップ精度が改善できることを示した。

スピンドルモーターによるナノギャップ高精度化手法では、従来の光ディスクシステム向けの高精度スピンドルモーターよりさらに精度を厳しくした近接場光ディスク用スピンドルモーターを開発した。新規に開発したスピンドルモーターの軸ぶれ精度は 1 μ m 以下、クランプ面ぶれ精度も 1 μ m 以下であり、本スピンドルモーターにより、ナノギャップを安定、かつ高精度にできることを明らかにした。

参考文献

- [1] T. Ishimoto, S. Kim, T. Yamasaki, T. Yukumoto, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Approach of Improving Disk Performance to High Quality Gap Control in a Near-Field Optical Disk Drive System", Jpn. J. Appl. Phys, Mo.6B, pp.3981-3986 (2007)
- [2] ASTM E756-83 Standard Method for Measuring Vibration-damping Properties of Material
- [3] 中島平太郎、小川博司、“コンパクトディスク読本”、オーム社 (1988)、pp.20-22
- [4] T. Ishimoto, K. Saito, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Near field readout system for a high density optical ROM disc", Proc. SPIE, 4342, pp. 294-303(2001)
- [5] S. Imanishi, T. Ishimoto, Y. Aki, T. Kondo, K. Kishima, K. Yamamoto and M. Yamamoto, "Near-Field Optical Head for Disc Mastering Process", Jpn. J. Appl. Phys. 39, Part 1, No.2B pp. 800-805 (2000)
- [6] T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "High-transfer-rate near-field writable system for a polycarbonate disc", Proc. SPIE, 5380, pp. 23-242 (2004)
- [7] T. Ishimoto, T. Matsui, S. Kim, K. Saito, K. Takagi, S. Haga, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Technologies for Removability in a Near-Field Optical Disc System", Proc. SPIE, 6282 C1-C10 (2006)
- [8] 三枝省三、山内良明、森 弘充、梅基敏行、市川厚司、“対物レンズアクチュエーター高次減衰の簡易評価法”、日本機械学会第 71 期通常総会講演会講演論文集 (□)、pp.733-735 (1994)
- [9] 石本 努、金 善敏、齊藤公博、近藤高男、中沖有克、川久保 伸、“ニアフィールド光ディスクシステムにおけるチルトサーボ技術”、電気学会 産業計測制御研究会、IIC-07-116、pp 1-6 (2007)
- [10] T.Ishimoto, S.Kim, K.Saito, T.Kondo, A.Nakaoki, and O.Kawakubo "Servo Technologies in a Near-Field Optical Disk Drive System", Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory, pp. 50-51(2007)

第6章 ダストロバスト化によるナノギャップ技術

6.1 はじめに

近接場光ディスクシステムは、SIL とディスク間が数十 nm と極めて近接している。このため、ヘッドとディスク間の距離は、従来の光ディスクよりもむしろハードディスクに近い。一方で、光ディスクシステムである以上、ハードディスクと異なりディスクのリムーバブル性が要求される。ディスクがリムーバブルであることから、ディスク面ぶれ、偏芯が不定であり、大きさも数十 μm 以上であることがハードディスクと大きく異なる。また、ダストが容易にシステム内に進入し、ヘッドとディスク間をナノギャップ精度に制御するにあたり、大きな障害となりうる。前者の面ぶれに対するヘッドのナノギャップ追従性については、前章までのギャップサーボ技術、チルトサーボ技術、コンポーネント改善によるナノギャップの高精度化技術において述べてきた。本章では、後者のダストに対するナノギャップの安定化技術について述べる。

本研究対象である固体浸レンズ(Solid Immersion Lens; SIL)を用いた近接場光ディスクシステムは、ハードディスクと同様に記録再生ヘッドとディスクとのギャップが数十 nm 程度であるのに対して、通常のオフィス環境下にて安定に動作し、記録再生を行うことが可能であり、この点で本質的にハードディスクと異なりダストに対してロバストである。これは、ハードディスクと異なる独自のナノギャップ安定化技術を導入しているからである。ナノギャップ安定化技術としては、ヘッド形状を工夫することで原理的にダストロバスト化する技術、ナノギャップの維持をサーボ化することに基づく技術、想定外の外乱によりサーボが破綻してディスクに SIL が衝突してもメディア表面を保護するトップコート技術、ダストによりギャップサーボが破綻した際に、ギャップサーボを安定化させる技術がある。以下の節ではこれらの技術について述べる。

6.2 エアフローによるナノギャップ安定化[1]

6.2.1 コニカル型 SIL

本研究で用いている SIL は、図 6.2.1.1 に示すように超半球型でかつ、先端がコニカル型のものを用いている[2]。また、SIL 先端部は直径 $40\mu\text{m}$ で平面となっている。以下、コニカル型 SIL と呼ぶ。

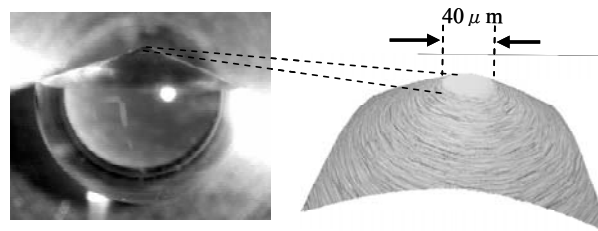


図6.2.1.1 コニカルSIL

一方、従来の研究で、図 6.2.1.2 に示すように半球型または超半球型で、SIL 端面に突起をもうけた形状の SIL を用いていた [3][4]。以下、この形状の SIL をネーベル型 SIL と呼ぶ。

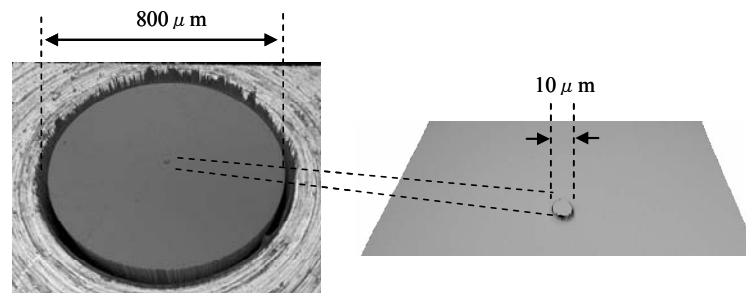


図6.2.1.2 ネーベルSIL

ネーベル型 SIL において、SIL 端面に突起が設けられているのは、SIL が傾いたときにディスク面と接触する角度の確保、つまり、チルトマージンの確保のためである[3]。図 6.2.1.3(a)にネーベル型 SIL の先端構造が示されている。この場合、SIL 先端がディスク面に接触する角度 θ_{N1} は以下のようになる。

$$\theta_{N1} = \tan^{-1} \frac{25nm}{5\mu m} = \tan^{-1} \frac{25nm + 2\mu m}{400\mu m} = 5.0(mrad) \quad \dots\dots\dots (6.2.1.3)$$

となる。一方、ネーベル型 SIL において、SIL 先端部の突起がない場合の接触角度 θ_{N2} は、以下のようになる。

$$\theta_{N2} = \tan^{-1} \frac{25nm}{400\mu m} = 0.0625(mrad) \quad \dots\dots\dots (6.2.1.2)$$

式(6.2.1.1)、式(6.2.1.2)を比較すると、SIL 先端部に突起を設けることで、接触角度を 80 倍にも拡大することが可能となる。

また、コニカル型 SIL の場合については、図 6.2.1.3(b)より、SIL 先端部がディスク面に接触する角度 θ_c は以下のようになる。

$$\theta_c = \tan^{-1} \frac{25nm}{20\mu m} = 1.25(mrad) \quad \dots\dots\dots (6.2.1.3)$$

式(6.2.1.1)、式(6.2.1.3)を比較すると、コニカル型 SIL とネーベル型 SIL とでは、SIL 先端部が傾くことによりディスクに接触する角度は、ネーベル型 SIL の方が 4 倍大きいことがわかる。つまり、ネーベル型 SIL の方がチルトマージンが 4 倍大きく、有利である。しかしながら、実験的、理論的にもネーベル型 SIL はダストに対して弱く、コニカル型 SIL の方がダストロバスト性の観点から有利である。このため、チルトマージン確保よりもダストロバスト性の確保の方に重点を置いて、本研究における SIL ではコニカル型 SIL を採用し、チルトマージンについては、第 4 章で述べたチルトサーボにより対処することになっている。次節にて、エアフローの観点から両者の比較検討を行う。

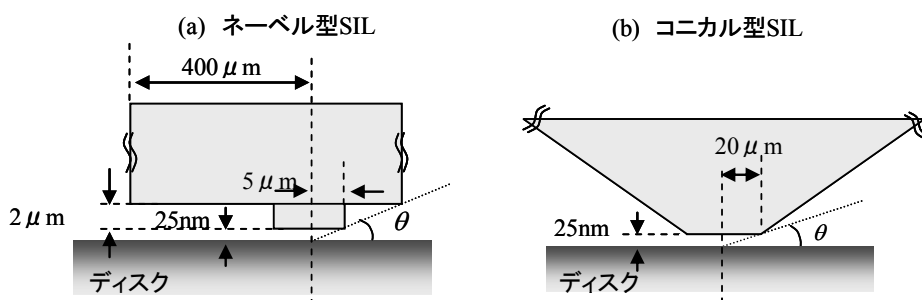


図6.2.1.3 SIL先端構造及び、チルトマージン

6.2.2 エアフロー解析[1]

本節では SIL の先端形状によるエアフローの違いについて検討する。図 6.2.1.4 に、エアフローシミュレーションに用いたコニカル型 SIL、ネーベル型 SIL の構造を示す。

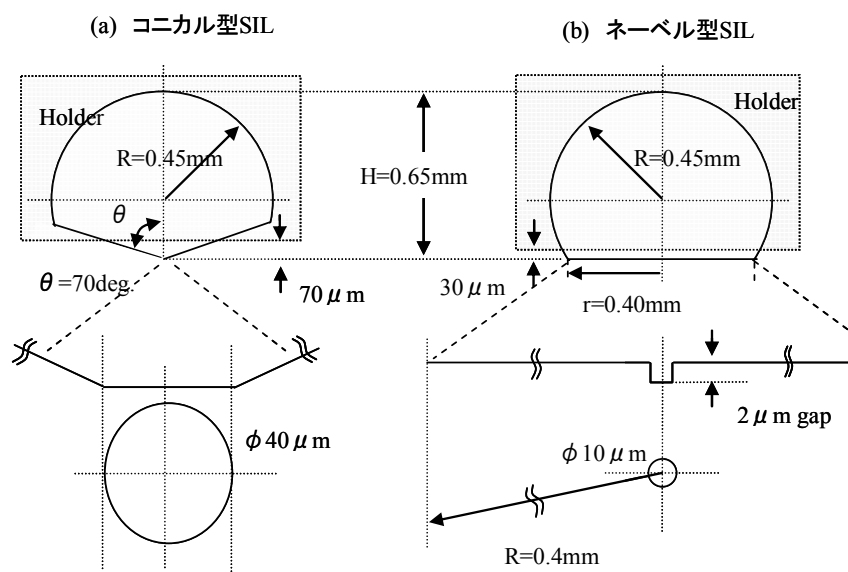


図6.2.1.4 エアフローシミュレーションに用いたSIL構造

解析モデルとしては、図 6.2.1.4 に示すパラメーターを用い、有限要素法により図 6.2.1.5 に示す 1/2 対称 3 次元モデルを構築した。空気流体は非圧縮流体とし、空気が流れる方向は図 6.2.1.5 に示す通りである。また、SIL 先端部の境界条件、SIL 上面断面部の壁面境界条件、1/2 対称面の対称境界条件における圧力境界条件は 0(Pa)とした。また、SIL 先端部とディスク面とのエアギャップは、実際には 25nm 程度であるが、本シミュレーションでは、SIL 端面周辺部のエアフローを調べることからゼロとし、Nervier-Stokes 方程式による流体の挙動解析を、米 Flow SCIENCE INC. 社の Flow-3D というソフトウェアを用いて解析をした。

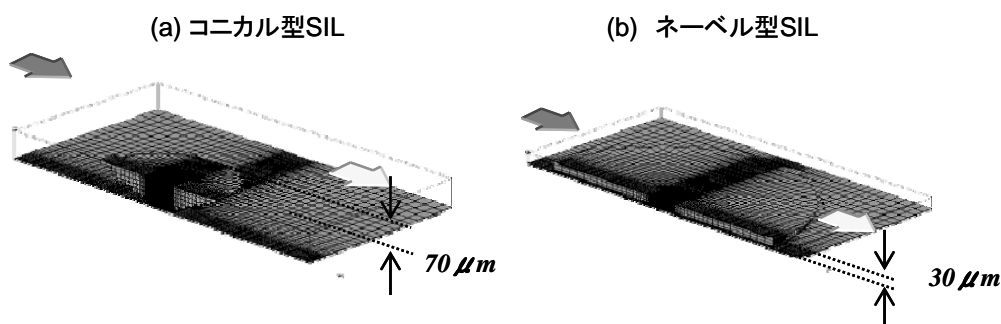


図6.2.1.5 シミュレーション解析モデル

評価方法は、図 6.2.1.6 に示すように、エアフローを解析後、マーカー粒子を SIL 先端部中心からの距離 y を $1\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ と可変させて放ち、また、高さ z を可変させて放つことにし、マーカー粒子の軌道におけるディスクとSIL間のギャップを評価することにした。また、粒子の質量は大気と同一であり、大気との相対質量はゼロとし、粒子の大きさはなく質点として扱うことにした。

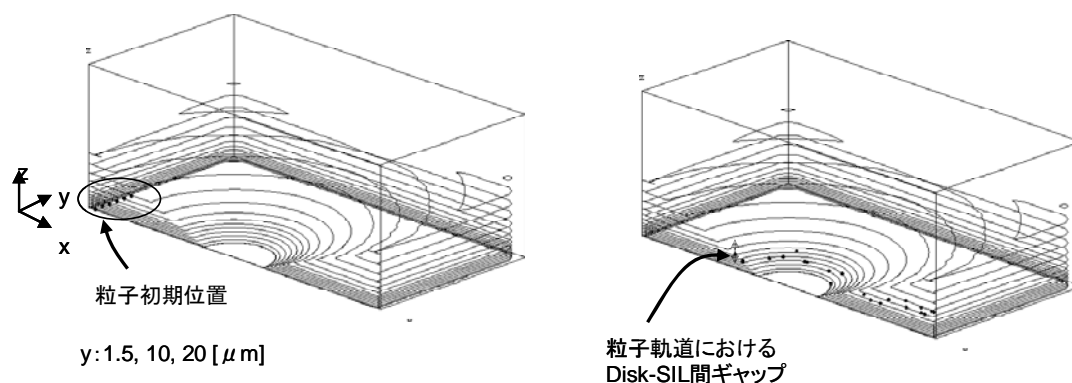


図6.2.1.6 エアフロー評価方法

図 6.2.1.7 に、ディスク速度線速 $v=6.3\text{m/s}$ 、 $z=1.5\mu\text{m}$ の場合のエアフロー（パーティクル流線）を示す。

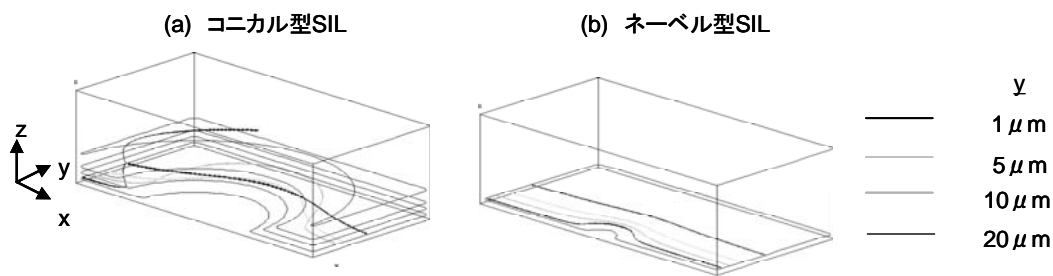


図6.2.1.7 SIL形状の違いによるエアフローの違い($z=1.5\mu\text{m}$, $v=6.3\text{m/s}$)

図 6.2.1.7 より、コニカル型 SIL の場合は、SIL 先端部に接近するパーティクル、つまりダストに対してはダストを巻き上げるようなエアフローが生じ、原理的にナノギャップである SIL 先端部に接近しないことがわかる。また、SIL の先端部から離れた位置から SIL に接近するダストについては、SIL テーパー部に沿うようなエアフローより、やはりダストが SIL 先端部に接近することを原理的に防止できることがわかる。また、SIL の先端部はテーパ型をしており、SIL から遠くなるにつれてディスクと SIL の対向距離は、SIL 先端部からの距離 y に対して、 $0.36y$ の比率で y に比例して離れており、SIL 先端部から離れるにつれて SIL とディスク間にダストが挟み込まれる可能性が小さくなっている。

一方のネーベル型 SIL については、SIL 先端部に沿うようにエアフローが生じるため、SIL に接近したダストは全て SIL とディスク面の対向面の $2\mu\text{m}$ のギャップにダストが流入することがわかる。さらに、SIL 端面とディスク面とは、コニカル型 SIL と異なり平面で対向している。以上から、ネーベル型 SIL はコニカル型 SIL と比較してダストの影響を原理的に受けやすいことがわかる。

図 6.2.1.8、図 6.2.1.9 に、コニカル型 SIL、ネーベル型 SIL の場合のダストに対する挙動の実例を示す。

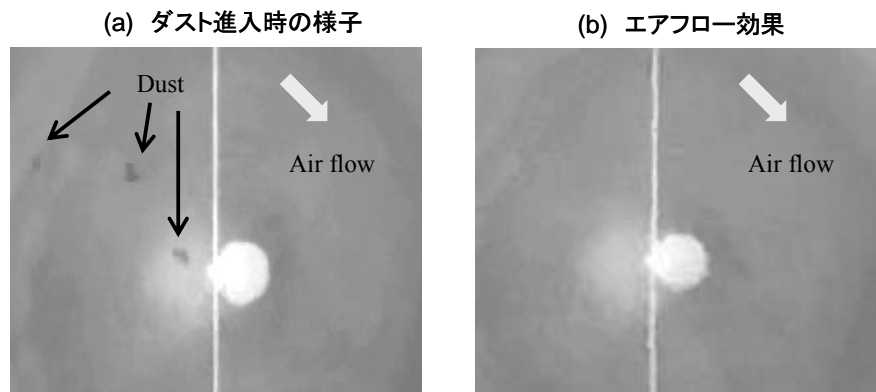


図6.2.1.8 コニカル型SILのエアフロー効果によるダストロバスト性

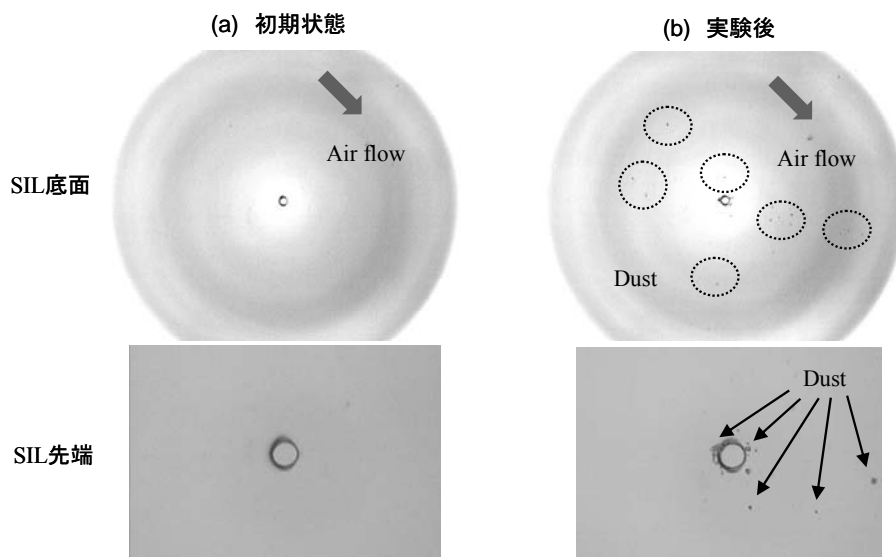


図6.2.1.9 ネーベル型SILのダスト非ロバスト性

図 6.2.1.8 は、コニカル型 SIL のエアフロー効果によるダストロバスト性の実例を示すもので、図 6.2.1.8(a)は、SIL 端面のテーパ部に入塵している様子を示している。これらのダストは、図 6.2.1.8(b)に示すようにコニカル型 SIL のエアフロー効果により吹き飛ばされる。

図 6.2.1.9 は、ネーベル型 SIL の場合のダストに対する非ロバスト性を示している。初期状態では、図 6.2.1.9(a)に示すように SIL のディスク対向面は清浄であるが、ギャップサーボ実験後の SIL 端面の様子を観察すると図 6.2.1.9(b)に示すように SIL 端面や SIL 突起部周辺部にダストが付着したままであることがわかる。これらの結果はシミュレーション結果と合致している。なお、ネーベル型 SIL の場合は、図 6.2.1.9 に示すように SIL 端面が汚染される前に、 $2\mu\text{m}$ ギャップ面が汚染されることでナノギャップを維持できなくなる場合が多かった。また、これら $2\mu\text{m}$ の突起周辺部に付着したダストは、レンズクリーニングペーパーでも清浄しにくいという問題があった。

以上の結果は、コニカル型 SIL の場合は、通常のオフィス環境下においても安定してナノギャップサーボを行える一方、ネーベル型 SIL の場合は、同様な環境下においては安定したナノギャップサーボが行うことができないという実験事実と合致している。

次に、SIL 部に生じるエアフローによる圧力の影響について述べる。図 6.2.1.10 に、図 6.2.1.7 に示すシミュレーション条件時のコニカル型 SIL、ネーベル型 SIL の圧力コンター図を示す。なお、図中のベクトル線はエアフロー速度ベクトル線を示している。

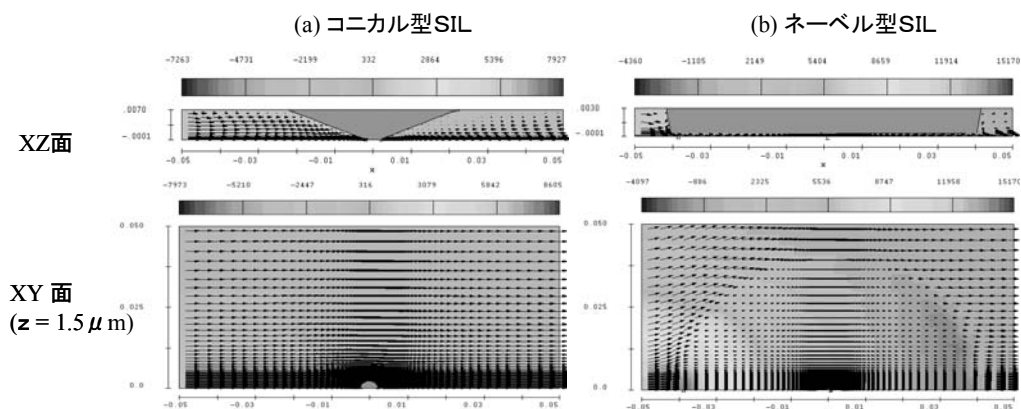


図6.2.10 圧力コンター図、及びエアフロー速度ベクトル図 ($v=6.3\text{m/s}$)

コニカル型 SIL の場合は、SIL への空気の入出面、退出面での圧力が大気圧に対して共に 84N/m^2 であり、進入面、退出面の相対圧力差は生じないことがわかった。一方のネーベル型 SIL は、進入面が 1173N/m^2 、退出面が 0N/m^2 つまり大気圧であり、コニカル型 SIL と異なり相対圧力差が大きいことがわかった。つまり、コニカル型 SIL が SIL 先端部を中心とした空気抵抗が小さいエアフローを形成している一方、ネーベル型 SIL は SIL 部周辺部の空気に対して壁のように立ち上がり、空気抵抗が高くなっていることがわかる。この空気圧力の点からもコニカル型 SIL の方が、ネーベル型 SIL よりも優れていることがわかる。

6.2.3 ナノギャップへの影響

§ 6.2.2 で述べたように SIL 先端部に生じるエアフローの影響は、コニカル型 SIL、ネーベル型 SIL により異なる。本節では、エアフローのナノギャップへの影響について述べる。

図 6.2.3.1 に、SIL 先端部のエアフローにより生じる SIL に対する圧力外乱、トルク外乱の SIL 形状による比較を示す。

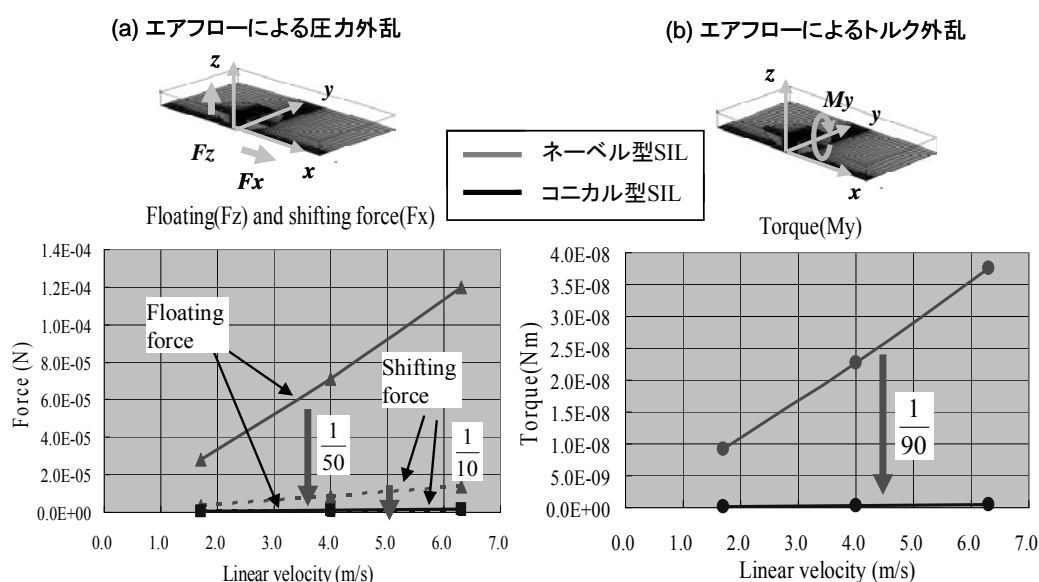


図6.2.3.1 エアフローによる圧力外乱、トルク外乱の影響

図 6.2.3.1(a)は、線速に対するエアフローによる圧力外乱の大きさを示したものであり、図 6.2.3.1(b)は、線速に対するエアフローによるディスク周方向のトルク外乱の大きさを示したもので

ある。図 6.2.3.1(a)より、エアフローによる SIL の浮上力は、コニカル型 SIL の方がネーベル型に比べて $1/50$ 程度小さいことがわかる。また、エアフローによるラジアル方向への SIL の移動力については、浮上力と比べて $1/6$ 程度と小さい。そして、このエアフローによる移動力に着目して比較しても、コニカル型 SIL はネーベル型 SIL の $1/10$ 程度と小さい。また、図 6.2.3.1(b)に示すエアフローによるトルク外乱につづいても圧力外乱と比べて $1/3000$ 程度と小さい上に、コニカル型 SIL はネーベル型 SIL の $1/90$ 程度と小さい。

次に、これらの圧力外乱、トルク外乱によるナノギャップ、ナノギャップチルトへの影響を調べる。なお、解析では、SIL を 2 軸アクチュエーターに搭載した 3 次元モデルを構築し、レンズ、ボビン、レンズホルダー、コイル、スプリング等のアクチュエーター各部の機械特性値を用いて有限要素法にて線形解析を行った。

まず、ナノギャップへの影響を図 6.2.3.2 に示す。

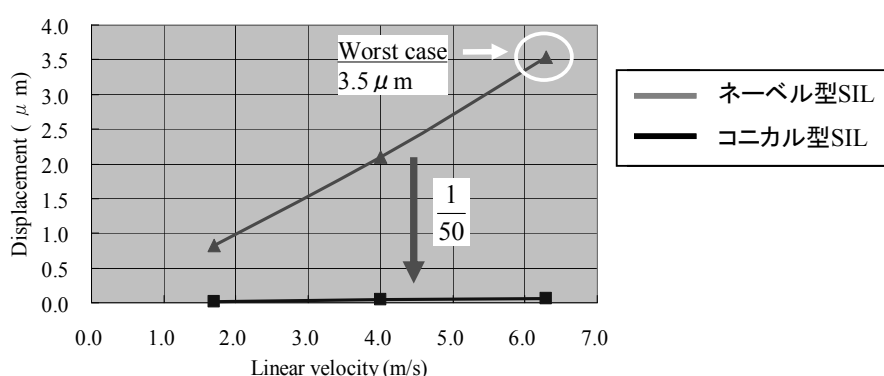


図6.2.3.2 エアフローによるナノギャップの影響

図 6.2.3.2 は、線速に対するエアフローによるギャップ浮上量を示すものである。図 6.2.3.2 より、コニカル型 SIL はネーベル型 SIL の場合の $1/50$ 程度小さく、エアフローによる浮上効果は無視できるのに対して、コニカル型 SIL の場合は、例えば線速 6.3m/s のときにエアフローによる浮上力により SIL をディスク面上から $3.5\mu\text{m}$ 浮上してしまうことがわかった。本研究でのナノギャップサーボは、フィードバックサーボによるアクティブサーボであることから、このようなエアフローによる外乱に対しても所望のギャップ長に制御できると考えられるが、線速度により浮上外乱が異なることや、浮上による外乱の周波数成分によっては難しい。この点で、コニカル SIL の場合は、線速が変化してもほとんど浮上力の影響は無視できる程度に小さく、安定したナノギャップを実現する上で有利であると考えられる。

次に、ナノギャップチルトへの影響を図 6.2.3.3 に示す。

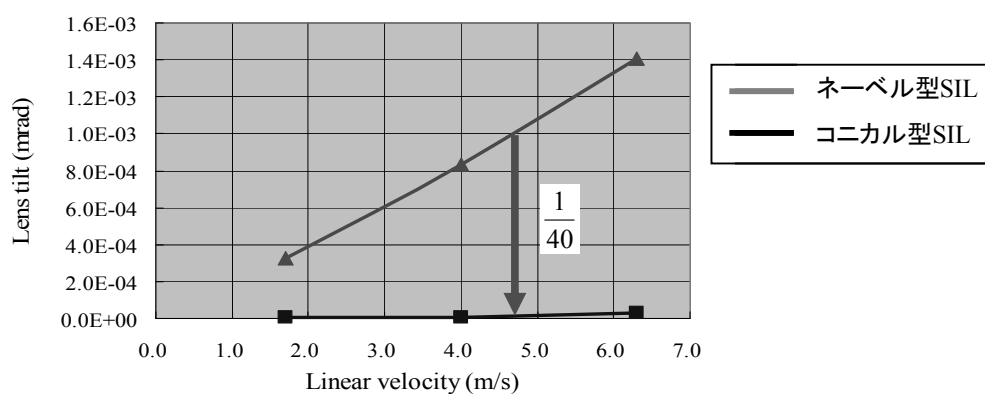


図6.2.3.3 エアフローによるレンズチルトへの影響

図 6.2.3.3 は、線速に対する SIL のチルト角 (mrad) を示したものである。図 6.2.3.3 より、コニカル型 SIL であってもエアフローに起因するチルト角は、 10^{-3}mrad オーダーである。一方、本研究でのチルトマージンは、第 4 章 § 4.2.1 より $\pm 0.07\text{deg}$ 、つまり $\pm 1.25\text{mrad}$ である。これより、エアフローによるチルトの影響は十分に小さいことがわかる。コニカル型 SIL の場合は、さらにネーベル型 SIL の場合の 1/40 程度であることから、エアフローにチルトの影響は全く無視できると考えられる。この点でも、コニカル型 SIL はネーベル型 SIL に比べて性能は優れているとわかった。

以上より、以下の点でコニカル型 SIL はネーベル型 SIL と比較して優れていることがわかった。

- ① ダストに対するエアフロー効果
- ② エアフロー外乱の影響
- ③ エアフローによるチルトの影響

以上のコニカル型 SIL の利点について、実測結果、及びシミュレーション結果の両面から裏付けることができたことから、本研究ではコニカル型 SIL を採用している。

6.3 サーボシステムによるナノギャップ安定化[1][5]

§ 6.2 で述べたように、コニカル型 SIL の場合はエアフロー効果によりダストは吹き飛ばされるため、SIL 先端部にはダストは原理的に接近しない。しかし、SIL 先端部のテーパ部加工において、テーパ部の表面が理想通りに完全に平滑化されているわけではない。この場合、ダストがテーパ部分に捕捉されてしまう可能性がある。この様子を図 6.3.1 に示す。しかしながら、SIL とディスク間の距離は 25nm 程度であることから、基本的にはナノギャップにダストは進入することはない。例えばインフルエンザウィルスは直径が 200nm の粒子サイズであり、ウィルスさえも SIL とディスク間のギャップに進入することはできない。金コロイド粒子が直径 10nm 程度、水分子が 1nm 程度であることから、分子、原子ならば進入可能なサイズであるとも言える。このため、サーボにより SIL とディスク間が近接場状態に保持されており、ナノギャップを維持されている限りは、基本的にはダストはナノギャップに進入することなくシステムは安定であるといえる。

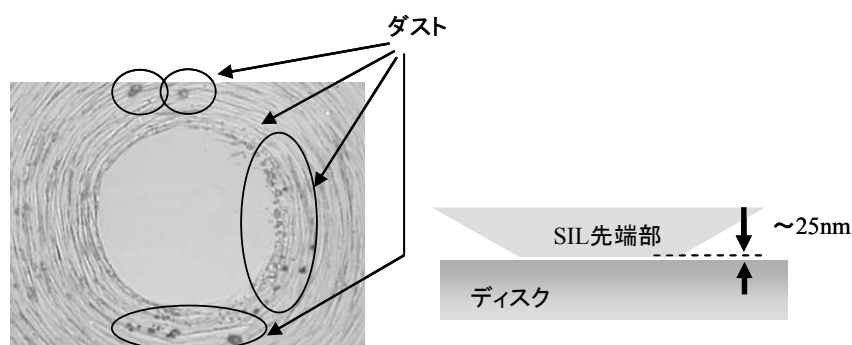


図6.3.1 ナノギャップ効果

しかしながら、外部振動外乱が印加されたり、メディア上の付着しているダストにより SIL が振られてしまう場合などに、SIL とディスク間のギャップが 25nm に一瞬でも維持できなくなる場合が生じる。このような場合、ギャップ間は数 μm 以上には容易になりうる。このため、ダストがギャップ間に進入する可能性が生じる。但し、このような場合でも、ハードディスクドライブのようにヘッドとディスク間のエアフローによる浮上ではなく、ギャップエラー信号によるフィードバックサーボを行うことで、ハードディスクの場合と異なり、直ちにシステムが破綻することはない。このサーボによるギャップサーボ安定動作の実例を図 6.3.2 に示す。

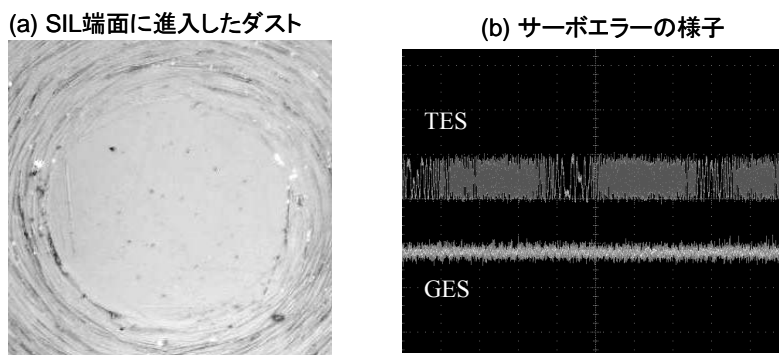


図6.3.2 アクティブサーボ効果

図 6.3.2(a)に示すように、ギャップ間にダストが進入し SIL 端面にダストが付着してしまっているが、図 6.3.2(b)に示すように、ギャップエラー信号 (Gap Error Signal; GES) にダストの影響は見られず、安定してギャップサーボがかかり、トラッキングエラー信号 (Tracking Error Signal; TES) が安定して得られていることがわかる。これは、SIL とディスク間にダストが進入しても GES が得られる限りは、ギャップサーボによりギャップが維持されることになるからである。

図 6.3.3 は、§ 6.5 に述べるトップコート付きメディアがない表面記録再生の場合のアクティブサーボ効果を示すものである。なお、この実験では、SIL 端面でのダストの様子が観察しやすいように、レーザーを SIL 中心から外して入射している。

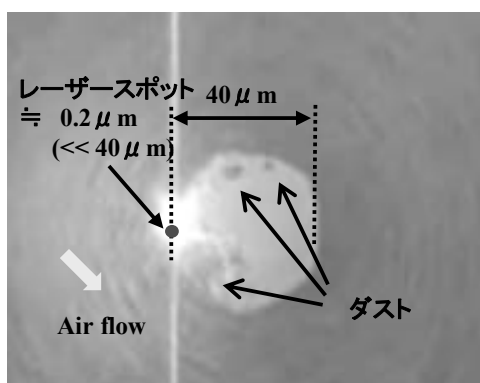


図6.3.3 アクティブサーボ効果

ディスク表面にトップコートがない表面記録再生の場合、ディスクの表面にビームがフォーカスされており、この場合のビームスポット径は 200nm 程度となっている。図 6.3.3 に示すように、SIL 端面がダストにより汚染されていても SIL 端面のビーム照射位置は汚染されていなければ、サーボエラー信号は得られることからギャップサーボによりナノギャップを維持することが可能である。一方、トップコート付きメディアの場合は、SIL 端面にデフォーカス状態にてビームが照射されるため、スポット径は、 $1 \mu\text{m}$ 程度と大きくなる。このため、ダストにビームが照射される可能性も表面再生の場合と異なり高くなるが、デフォーカス状態にて戻り光を再生することから逆にダストに対する感度は落ちることになる。このため、やはり表面記録再生の場合と同様に、SIL とディスク間にダストが進入してもギャップサーボによりギャップが維持されることになる。このように SIL 端面が汚染されていても必ずしもナノギャップは破綻することないことは、ハードディスクシステムと異なり、アクティブにギャップサーボを行っている SIL 型近接場光ディスクシステムの大きな特徴である。

以上までは、アクティブにギャップサーボを行うことで、ダストに対してロバストにナノギャップを維持するという手法であった。ところが、ナノギャップ以上のダストがある場合、ナノギャップにはダストは入り込まないが、当該ダストにより SIL が振られてしまう可能性がある。また、外部ショックや振動によっても SIL が振られてしまう可能性がある。このような場合に対処するために、SIL が異常に振られていることが判明したら、無理してギャップサーボをかけ続けずに、サーボを強制的に停止することで SIL を保護するとともに、サーボし続けることによるディスク表面のダメージを悪化防ぐ手法も必要である。例えば、ディスク回転数が 2000rpm のときに、ダストの影響により、SIL が振られてメディアに衝突する状態のままである場合を図 6.3.4 に示す。

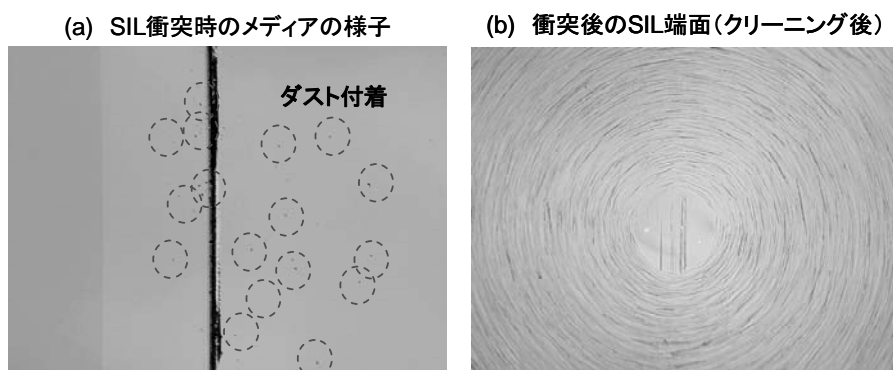


図6.3.4 フェールセーフ動作がない場合のSIL衝突時のメディア、SILの様子

図 6.3.4 に示すように、メディア表面がひどく傷つき、傷ついて欠落したメディア材料がメディア表面に散乱してしまっている。また、この時の SIL の表面には、メディア表面の物質が付着しているが、付着物を除去した後を観察すると、図 6.3.4(b)に示すように、SIL の表面が傷ついてしまっていることがわかる。これは、ダストの影響で SIL が振られ、メディア表面に激しく衝突しているのにもかかわらず、ギャップサーボをかけ続けてしまっていることが一因である。そこで、このようにダストの影響、もしくは外部外乱により SIL が振られてメディアに衝突してしまうような場合、SIL、メディア双方へのダメージを軽減するために、強制的にギャップサーボを停止してしまう手法が望ましい。この手法をフェールセーフサーボと呼ぶことにする。図 6.3.5 に本手法による結果を示す[6]。

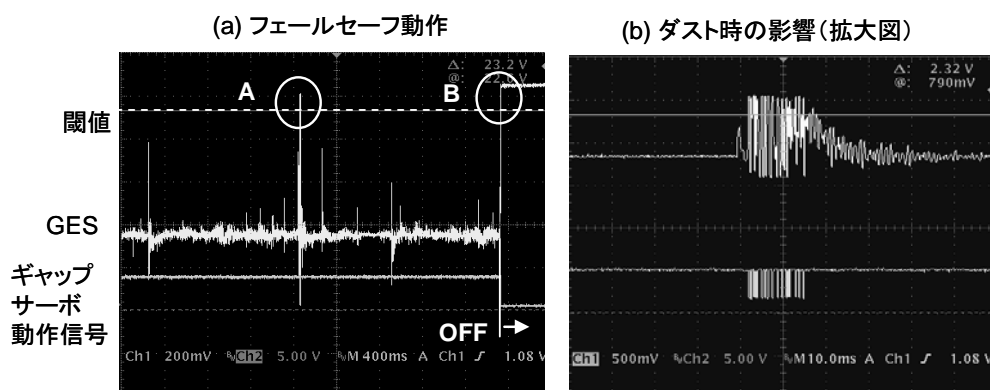


図6.3.5 ギャップサーボのフェールセーフ動作

図 6.3.5(a)はフェールセーフ動作の動作例を示している。ダストがあった場合、ギャップサーボに対してダストは外乱として作用するため、GES は、乱れて図 6.3.5(a)に示すようにスパイク状となる。本研究でのフェールセーフ動作では、GES に対して閾値を設け、閾値以上の大きさに GES

がなった回数をカウントし、一定のカウント以上になったら強制的にギャップサーボを停止するようにしている。閾値の大きさ、カウント閾値は、厳しく設定しすぎるとギャップサーボが外れやすくなることから実験的に定めた。図 6.3.5 の実験例では、閾値を、§ 3.5.2 で述べているギャップサーボ開始電圧に設定し、カウント閾値は 20 回と設定している。図 6.3.5(a) の例では、A の部分で、閾値を超えている。図 6.3.5(b) にその拡大図を示す。GES をコンパレータで比較し閾値を超えたらギャップサーボ動作制御信号を OFF (Hi レベルから Low レベル) にするようにしている。この OFF になった回数をカウントして、カウント閾値以上になった時点で、ギャップサーボを強制的に停止する。図 5.3.5(a) では、B のところで、カウント閾値を超えたため、強制的にギャップサーボを停止している。このため、B 以降は、SIL はファーフォールド状態であることから、GES は一定値になっている。このように、本研究における近接場光ディスクシステムでは、GES が大きく振動するようなダスト、外部外乱が印加したときには、安全のためにギャップサーボを強制的に停止するフェールセーフサーボを導入している。フェールセーフサーボ機能により、図 6.3.5 のようにメディア表面、もしくは SIL 表面がひどくダメージを受けることはなくなった。このフェールセーフ動作と § 6.5 で述べるディスク表面のトップコート技術により、近接場光ディスクシステムのダスト、ショック外乱などに対するロバスト性を確保している。

6.4 ヘッドメディアインタフェースによるナノギャップ安定化

本節では、ヘッドメディアインタフェースの観点からナノギャップ安定化を考察する。

コニカル型 SIL とネーベル型 SIL について、図 6.4.1 に両者のディスクとの対向面積の比較を示す。

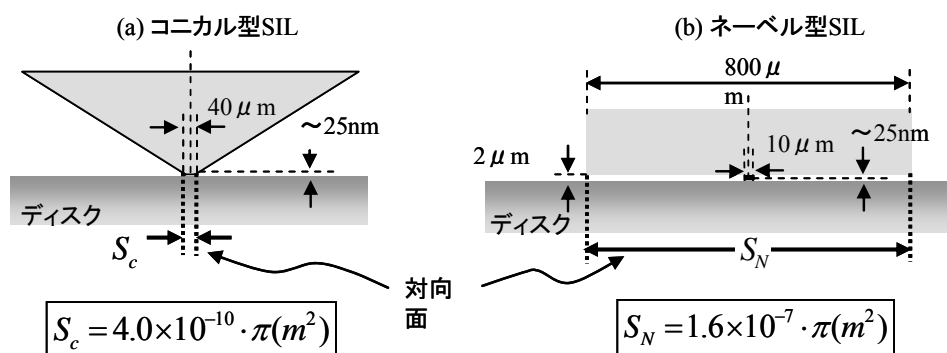


図6.4.1 SILNのディスク対向面積

図 6.4.1 に示すように、ネーベル型 SIL の SIL 端面とディスクとの対向面積は $1.6 \times 10^{-7} \cdot \pi(m^2)$ であるのに対して、コニカル型 SIL は $4.0 \times 10^{-10} \cdot \pi(m^2)$ であり、ネーベル型 SIL に対して 1/400 倍も小さい対向面積を持っている。つまり、コニカル型 SIL はいわば“点”でディスクと接している一方、ネーベル型 SIL は“面”で接しており、コニカル型 SIL の方がダストを遭遇する確率は 400 倍小さいことになる。このように、ディスクとの対向面積の点でもコニカル型 SIL はネーベル型 SIL と比較して有利である。つまり、対向面積の観点からも、2μm ギャップに入り込んだダストは、図 6.2.1.9 に示すように容易に 2μm のギャップにトラップされてしまう傾向があるといえる。この結果、図 6.2.1.9 にも示すように、SIL 端面は汚染されていないものの 2μm ギャップが汚染されてしまい、図 6.4.2(b) に示すように、ギャップエラー特性が悪化し、図 6.4.2(a) に示すような正しい“1-0”特性が得られず、安定なギャップサーボができなくなる。

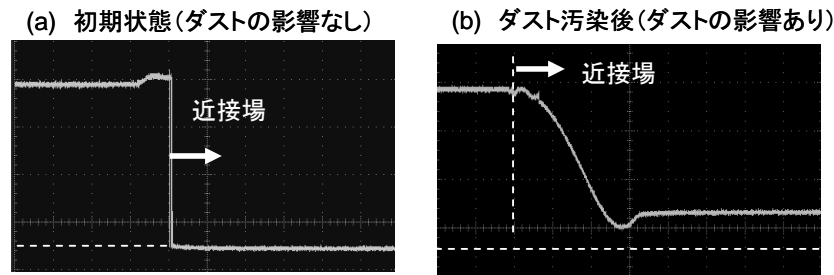


図6.4.2 ダストのギャップエラーへの影響(ネーベル型SIL)

次に、ハードディスクドライブのフライングヘッドと比較する。図 6.4.3 にコニカル型 SIL とフライングヘッドとの比較を示す。

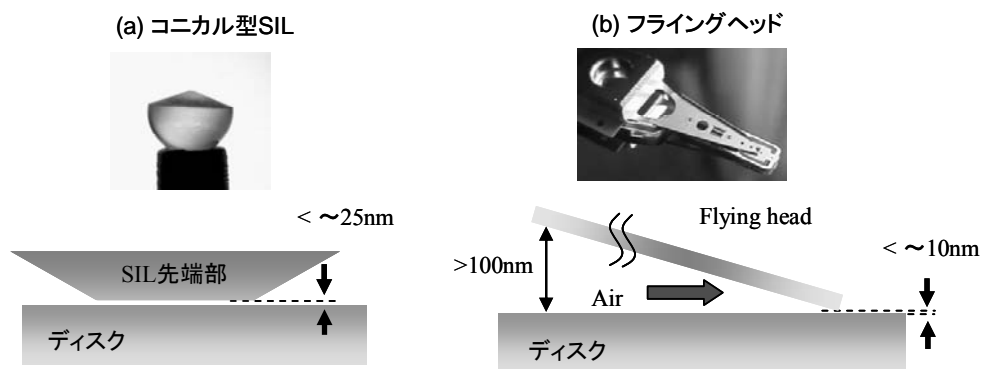


図6.4.3 コニカル型SILとフライングヘッドとの比較

フライングヘッドは、ディスク回転によりフライングヘッド端面とディスク間との間に流入する空気圧により、ディスクから 10nm 以下の距離に浮上している。浮上距離は、一般にディスク回転時に生じるフライングヘッドのディスク対向面に生じるエアの負圧、正圧のバランスで決まり、エア圧力は、フライングヘッド端面の形状とディスク回転数で決まる。また、そのフライングヘッドの大きさも最新のピコスライダと呼ばれるものでも、 $1\text{mm} \times 1.25\text{mm}$ 程度ある[7]。従って、フライングヘッドの対向面積は、 $1.3 \times 10^{-6}\text{m}^2$ 程度となり、サイズの的にはネーベル型 SIL に近い。一方、コニカル型 SIL は § 6.4 に示すように、ディスクとの対向面は $40\mu\text{m}$ の円形であり対向面積は $4.0 \times 10^{-10}\pi(\text{m}^2)$ である。このためディスクとの対向面積は、ハードディスクに比べて 10^4 程度も小さい。また、フライングヘッドでは、構造的にディスクに対してチルト対向しており、エア流出部で 10nm 程度のエアギャップであるもののヘッドのエア流入部では 100nm 以上のエアギャップがある。このため、エアフローの観点、エアギャップの観点から、フライングヘッドの端面にダストが流入しやすい構造となっている。一方のコニカル型 SIL の場合は、SIL 端面が一様に 25nm の狭ギャップでディスクに対向しており、また、エアフローの観点からも狭ギャップをエアが流入しにくい構造となっている。

以上の観点から、コニカル型 SIL による近接場光ディスクシステムは、同じくナノオーダーの狭ギャップを有するハードディスクと異なり、ナノギャップ安定性が本質的に高い。このことは、本研究による近接場光ディスクシステムが、通常のオフィス環境下でも安定してナノギャップを実現できることに寄与しており、この点がハードディスクドライブと原理的に異なる点であり、かつ、有利な点となっている。

6.5 ディスクによるナノギャップ安定化[8][9]

6.5.1 SIL 衝突時の技術的課題

本節では、ディスク表面を SIL の衝突による損傷から保護することによりナノギャップを安定化する手法について述べる。

前節までのように、エアフロー効果、アクティブサーボ効果、ナノギャップ効果により、コンカル SIL を用いた近接場光ディスクシステムは、原理的にダストに対してロバストであるが、メディアに付着したダスト、ナノギャップに対して大きい数 $10\mu\text{m}$ 以上の大きさのダスト、外部ショック、振動によっては、ナノギャップが維持できず、SIL が大きく振られる場合がある。この場合、SIL がディスク表面に衝突し、図 6.5.1 に示すようにディスク表面が損傷し、ギャップサーボが外れてしまう恐れがある。そこで、このような場合にディスクまたは SIL の損傷を軽減するために、§ 6.3 においてサーボの観点からフェールセーフ機能を導入した。

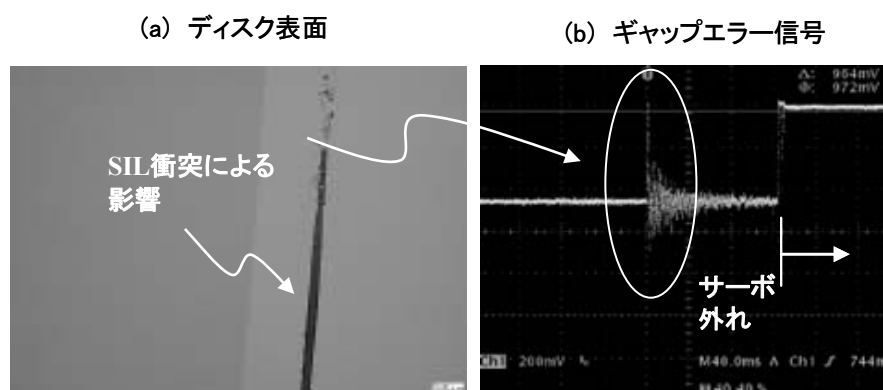


図6.5.1 SILのディスク衝突の影響

フェールセーフ機能により、図 6.5.1 に示すような深刻なメディア損傷は軽減できるが、フェールセーフ機能が機能する前の衝突によりメディアが少なからず損傷する可能性がある。サーボシステム的には、フェールセーフ機能によりメディア、SIL の損傷拡大を防止できる意義があるが、記録媒体としての光ディスクを考えた場合、メディア損傷により記憶データが読み書きできなくなるのは望ましくない。そこで、フェールセーフ機能に加えて、メディア表面を SIL の衝突現象から保護する手法が求められる。この手法として、メディア表面を硬い被膜で覆い SIL が衝突した際にメディアの記録層の損傷を防ぐトップコートを導入する。

まず、トップコートの衝突ロバスト性を評価するための衝突試験仕様を明らかにし、次に、仕様に基づいた衝突試験機を導入する。そして、実際の衝突試験結果、及びトップコートの効果を実証する。

6.5.2 衝突試験仕様

ダストやシステムに印加された外力により SIL がディスクに衝突した際に、トップコートが満足すべき条件は、以下のようである。

メカ的な観点

回転数 3,000rpm、面ぶれ量 $40\mu\text{m}$ のディスクに対して、SIL が衝突してもディスク損傷がないこと

光学的な観点

トップコートを透過して記録層に近接場光が照射できること

§ 4.4 に示した本研究における近接場光ディスクシステムに求められる基本要件によれば、ディスク回転数が 3,000rpm であり、そのときの最大面ぶれが $40\mu\text{m}$ である。また、SIL が衝突してもディスク損傷がないことが求められることから、SIL のディスクへの衝突は、弾性衝突であるとする。これが、メカ的な観点からの衝突要件である。

一方、光学的な観点においては、トップコート透過して記録層に近接場光が照射するためには、トップコートの屈折率 n が、近接場光ディスクシステムで実現される対物レンズの開口率 NA 以上であることが求められる[8]。図 6.5.2.1 にトップコートの屈折率と近接場光-ディスク間カップリング効率の関係を示す。

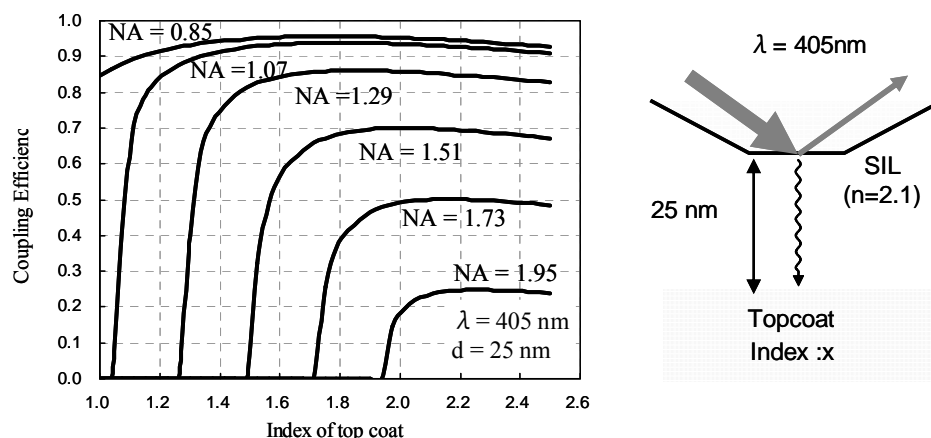


図6.5.2.1 トップコートの屈折率と近接場光-ディスク間カップリング効率

図 6.5.2.1 から、SIL 端面とディスク間との近接場結合効率の観点からは、トップコートの屈折率 n は、対物レンズの開口率 NA 以上にする必要があることがわかる。本研究における NA は 1.84 であることから、トップコート材料としての屈折率材料としては以下のものである必要がある。

$$n \geq \text{NA} \quad \Leftrightarrow \quad n \geq 1.84 \quad \dots\dots\dots (6.5.2.1)$$

次に、SIL がディスクに衝突するときのトップコートの衝突ロバスト性を評価するときの衝突条件を規定する。

衝突現象としては、以下の 2 つの場合を想定することにした。

- ① ダストにより引き起こされる衝突
- ② 外力（システムに印加されるショック、振動外乱）により引き起こされる衝突

また、以下の衝突現象は考慮しないことにした。

- ③ ファーフールド状態、つまり、初期位置からギャップサーボを開始した場合。
- ④ SIL 端面にダストが付着するなどしてギャップエラーが適切に得られず、ギャップサーボが不安定になり発振した場合。

③、④の場合を、それぞれ図 6.5.2.2(a)、(b)に示す。

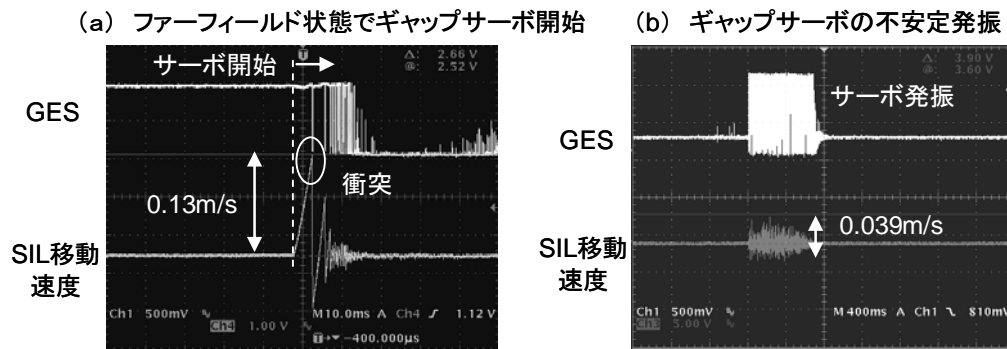


図6.5.2.2 考慮しないSIL衝突事例

図 6.5.2.2(a)のように、ファーフールド状態からギャップサーボを開始するのは、そもそも近接場システムが故障した場合に生じうる場合であって、通常では生じない。このため、このような衝突は考慮しないことにした。なお、このときの SIL 衝突速度は 0.13m/s であり、高々0.2m/s 以下であった。また、図 6.5.2.2(b)のようにギャップサーボが不安定になって発振する場合に対しては、§ 6.3 で述べたセーフティ機能により、このように完全に不安定になる前にギャップサーボを切ってしまうので、実際のシステムでは生じない。このため、このような衝突も考慮しない。なお、このときの SIL 衝突速度は 0.039m/s であり、高々0.05m/s 以下であった。このため、以下、衝突試験においては、①または②の衝突現象について衝突条件を規定することにする。

次に、衝突条件を規定するあたり、SIL がディスクに衝突する際の速度、加速度について考察する。図 6.5.2.3 に SIL のディスクへの衝突現象の物理モデルを示す。

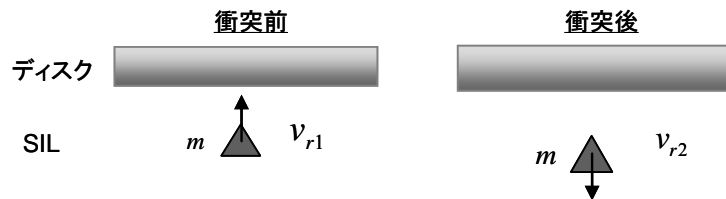


図6.5.2.3 SIL衝突現象の物理モデル

図 6.5.2.3 において、SIL の質量を m 、SIL のディスクに対する相対速度を衝突前後で v_{r1} 、 v_{r2} とすると、衝突前後の運動量の関係は次式のようになる。

$$m \cdot v_{r1} = m \cdot v_{r2} + \int F dt \quad \dots\dots\dots (6.5.2.2)$$

左辺は、衝突前の運動量、右辺第 1 項は衝突後の運動量、第 2 項は衝突エネルギーを表す。衝突前後の運動量変化を衝突時間で除すれば、衝撃加速度が得られる。しかしながら、複数のトップコートを評価するにあたり、式(6.5.2.2)の右辺である衝突後の速度の規定、衝突時間を規定するのは困難である。そこで、衝突試験においては、式 6.5.2.2 の左辺である衝突前速度を規定することになっている。また、式(6.5.2.2)より、弾性衝突においては、衝突前後の加速度は衝突現象には関係しない。そこで、衝突試験においては、衝突条件として、衝突前の SIL 速度を衝突速度として規定することにした。以下、条件①、②での衝突速度を見積もる。

① ダストにより引き起こされる衝突の場合の衝突速度

まず、ディスク面ぶれによるディスク面速度を見積もる。条件は、ディスク回転数 3,000rpm で、ディスク面ぶれ $40\mu\text{m}$ である。また、ディスク基板はポリカーボネードである。面ぶれ量 $40\mu\text{m}$ の条件で、クランプ状態を変えてディスク面ぶれ波形を可変としたときのディスク回転数とディスク面速度の関係を図 6.5.2.4 に示す。

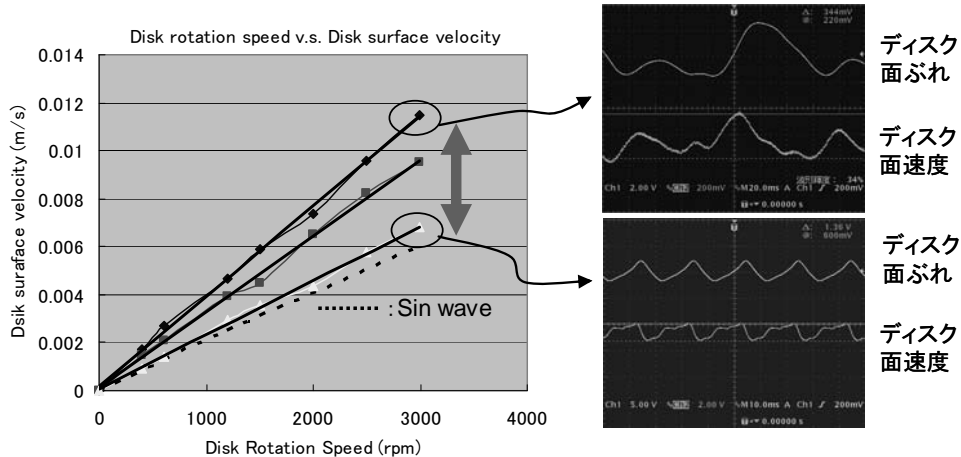


図6.5.2.4 ディスク回転数とディスク面速度の関係

図 6.5.2.4 において、実験条件の 3000rpm に着目する。ディスク面の歪みが回転 1 次成分しかない場合、つまり、面ぶれ波形がサイン波に近い場合は、面ぶれ速度は理論値 $V_{md-ideal}$ の 0.006m/s に近い値となっている。しかし、クランプ時の歪みが大きく、高次の回転成分までである場合は、理論値の倍の 0.012m/s となっていることが実験的にわかった。そこで、ディスク回転数 3000rpm、面ぶれ量 $40\mu\text{m}$ でのディスク面速度 V_{md} は、理論値 $V_{md-ideal}$ を基準にして以下のように規定した。

$$V_{md} = \alpha \cdot v_{md-ideal} = 2 \times 0.006 = 0.012(\text{m/s}) \quad \dots\dots\dots (6.5.2.3)$$

但し、 α は、理論値から振れ量を許容するマージンであり、図 6.5.2.4 の実験から $\alpha=2$ とした。

次に、ダスト外乱による SIL 速度を見積もる。SIL はダスト外乱により振られ、ダスト外乱の影響を抑制するようにギャップサーボループからのサーボ電圧により駆動される。SIL はアクチュエーターの AC 感度に基づいて印加された電圧に応じて駆動されることになる。従って、ヘッドの移動速度はアクチュエーターの AC 感度により規定できることになる。本研究で用いているアクチュエーターの AC 感度 (1kHz での測定値) は高々 10 (G/V) 程度である。従って、ヘッド速度 V_{hd} は以下のように規定される。

$$V_{hd} = \frac{10 \times 9.8}{2\pi \times 1000} = 0.016(\text{m/s}) \approx 0.02(\text{m/s}) \quad \dots\dots\dots (6.5.2.4)$$

ダストによる衝突の場合の最悪条件は、衝突時において、ディスク面と SIL 面が互いに接近方向に移動している状態で衝突する場合である。従って、ダストによる衝突の場合の衝突速度 V_d は、以下のように規定される。

$$V_d = V_{md} + V_{hd} = 0.012 + 0.02 \approx 0.03(\text{m/s}) \quad \dots\dots\dots (6.5.2.5)$$

これが、ダストより引き起こされる衝突の場合の衝突速度である。

② 外力により引き起こされる衝突の場合の衝突速度

次に、外力により引き起こされる衝突の場合の衝突速度を見積もる。システムに何ら外力が印加

されていないときは、ギャップサーボによりディスク面に SIL は追従する。このため、SIL 速度 V_{hd} とディスク面速度 V_{md} は等価であると考えられる。式(6.5.2.3)よりディスク面速度は、0.012m/s であることから、次式のように見積もられる。

$$V_{hd} = V_{md} = 0.012 \text{ (m/s)} \dots\dots\dots (6.5.2.6)$$

外力による衝突の場合の最悪条件は、衝突時において、SIL がディスク面ぶれに完全に追従しなくなり同相関係が崩れて、SIL とディスクが逆相になった場合である。また、外力起因の場合は、単に逆相になるだけでなく、外力により速度が増大する可能性もあるので、マージンファクタ α を規定し、マージンを考慮して規定することにした。本研究においては $\alpha=2$ として、外力による衝突の場合の衝突速度 V_d を規定すると、次式のようになる。

$$V_d = (V_{hd} + V_{md}) \times \alpha = (0.012 + 0.012) \times 2 \approx 0.05 \text{ (m/s)} \dots\dots\dots (6.5.2.7)$$

以上、ダストにより引き起こされる衝突の場合の衝突速度は式(6.5.2.5)、外力により引き起こされる衝突の場合の衝突速度は式(6.5.2.7)のように見積もられる。

最終的に、ダスト及び外力による衝突が同時に生じた場合を考える。この場合の衝突速度は、式(6.5.2.5)、式(6.5.2.7)より、それぞれの衝突速度の単純和として考えた場合で 0.08(m/s)、2 乗平均和として考えた場合で 0.06 (m/s)となる。従って、衝突速度は、高々0.1 (m/s) と見積もられる。これが近接場光ディスクシステムで起こりうる最大の衝突速度となる。

なお、ディスク回転数を 3,000rpm としたときは、式(6.5.2.3)、式(6.5.2.4)の示すように、ディスク面速度と SIL 速度が同じオーダーとなるため、衝突試験時においてはディスク面の面ぶれ量も含めて規定する必要があるが、実務的には実験評価に時間がかかり望ましくない。ところが、ディスク回転数が 1,200rpm の場合は、図 6.5.2.4 よりディスク面速度 V_d は 0.004(m/s)となり、式(6.5.2.4)の SIL 速度よりも 1 桁小さいオーダーとなるため、ディスク面速度は無視できて、SIL 速度のみで規定することが可能である。つまり、ディスク回転数を 1200rpm として衝突試験を行った場合、ディスク面ぶれを $40 \mu\text{m}$ に完全に調整する必要はなく、 $40 \mu\text{m}$ 以下であれば構わないことになる。そこで、実務的には、まず、ディスク回転数 1,200rpm、衝突速度 0.1m/s で衝突試験を行い、トップコート第 1 次の選別し、その後、選別が残ったトップコートに対して、面ぶれ量を $40 \mu\text{m}$ に規定したもとでディスク回転数 3000rpm にて衝突させて、最終的なトップコートの可否を判断するようにした。

以上、衝突試験時のディスク回転数、面ぶれ、衝突速度が規定されたが、この他、SIL についての規定なども含めて光ディスクのフォーマットブックに準拠して近接場光ディスクシステムにおける衝突試験フォーマットを規定すると、以下の表 6.5.2.1 のようになる。

表6.5.2.1 衝突試験フォーマット

レンズ材料	LAH79
レンズ直径	40 μm
ディスク表面性	近接場レベル*
レンズコーティング	なし
レンズ重量	0.4g
衝突前速度	0.1m/s
ディスク回転数	1200rpm、3000rpm
ディスク面ぶれ量	<40 μm (1200rpm)、40 μm (3000rpm)
衝突回数	1

*ギャップサーボが安定性かかるレベル

次節では、表 6.5.2.1 の衝突試験フォーマットに基づいた衝突試験を行うための衝突試験機について述べる。

6.5.3 衝突試験機

図 6.5.3.1 に近接場記録再生用トップコートの SIL 衝突ロバスト性を評価するための衝突試験機の外観を示す。衝突試験機には、ギャップサーボシステムが搭載されており、ナノ精度の分解能を持つギャップエラーにより、衝突前後のトップコートの表面性の調査を行うことができる。また、SIL の移動速度を計測するためのレーザードップラー計を搭載しており、SIL の衝突速度を規定するようになっている。また、SIL 表面を観察するために 400 倍～3000 倍の高倍率光学顕微鏡を備えており、衝突前後の SIL の表面を調べることができる。また、同時に SIL 端面のどの位置にビームが照射されているのか等のビームプロファイルを調べることが可能である。ディスクのクランプ面の面精度は $1\mu\text{m}$ 以下であり、クランプ時の面ぶれを $40\mu\text{m}$ 以下にすることができる。ディスク回転は PLL サーボにより規定の回転数に正確に設定することができ、回転計にて現在のディスク回転数をモニターすることができる。また、マグネスケールを搭載しており、規定の半径にて衝突することができる。なお、SIL とディスク間とのチルトを調整する機構も備えており、SIL がディスクに衝突するときに、SIL がチルトしてディスクに衝突することを防止している。



図6.5.3.1 衝突試験機

衝突試験機には、ディスク表面性観察モードと衝突試験モードの2つを備えている。図 6.5.3.2 にこれらのモードの仕組みを示す。

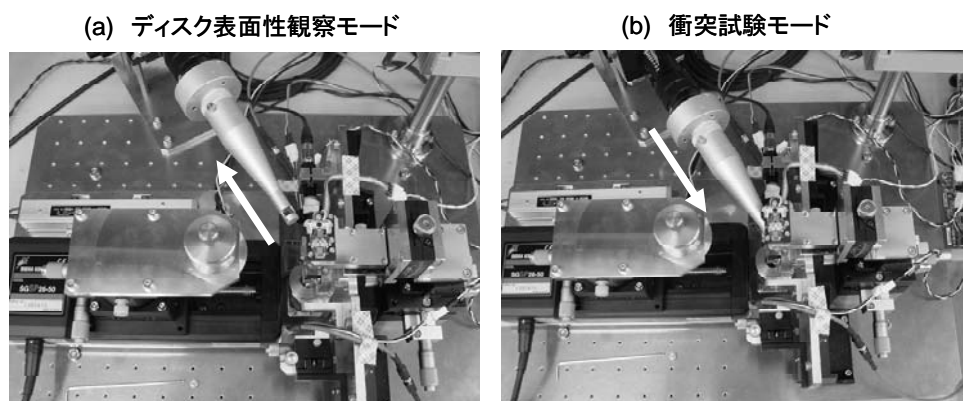


図6.5.3.2 衝突試験機の機能

図 6.5.3.2(a)はディスク表面性観察モードを示しており、本モードでは SIL 直下にあるレーザードップラー計の計測ヘッドを光軸から外す。このモードでは、波長 405nm のレーザーを用いてギャップエラーを調べる。§ 4.2.2 で述べている手法により、ギャップエラーにより SIL とディスク間の初期チルトを補正する。これにより SIL が傾いてディスクに衝突することを防ぎ、同一条件にてトップコートの衝突ロバスト性を評価するようにする。また、衝突試験前にディスク回転にてギャップサーボを行うことで、トップコートが近接場用として適するものかどうか調査する。衝突性能が優れていても表面性が悪く近接場状態にできないようでは意味をなさないからである。また、衝突後にもディスク回転にてギャップサーボを行い、衝突前後でギャップエラーを評価することで、ナノレベルでの衝突ロバスト性を評価することが可能となる。つまり、衝突試験後にギャップサーボを行った結果、衝突前に見られなかったインパルス外乱がギャップエラーに観察された場合は、衝突によるメディア損傷があると判断する。

図 6.5.3.2(b)は衝突試験モードを示しており、SIL をディスクに衝突させる前に、SIL 直下にレーザードップラー計の計測ヘッドを挿入し、SIL に印加する電圧を調整して、規定の SIL 速度になるようにする。SIL 速度が規定された後、実際にディスクに SIL を衝突させる衝突実験を行う。

衝突試験手順としては以下の通りである。

- ① ギャップエラーにて SIL とディスク間のチルトを補正
- ② 衝突試験前にギャップサーボを行い、ディスクの表面性を調べる。また、衝突前の SIL 端面の表面性を顕微鏡にて調べる。
- ③ 衝突試験フォーマット（表 6.5.2.1）に従い、衝突試験を行う。
- ④ 衝突試験後に、ギャップサーボを行い、ディスクの表面性を調べる。また、衝突前の SIL 端面の表面性を顕微鏡にて調べる。
- ⑤ ④の結果、ディスク表面、SIL 表面が問題なければ、衝突試験を行った衝突速度においてトップコート性能は問題なしと判断する。

以上、①～⑤が一連の衝突試験手順であり、この手順に従いトップコートを評価する。

6.5.4 衝突試験結果

本節では、トップコートの衝突試験結果について述べる。

まず、トップコートがない場合において、衝突試験を行った結果を図 6.5.4.1 に示す。

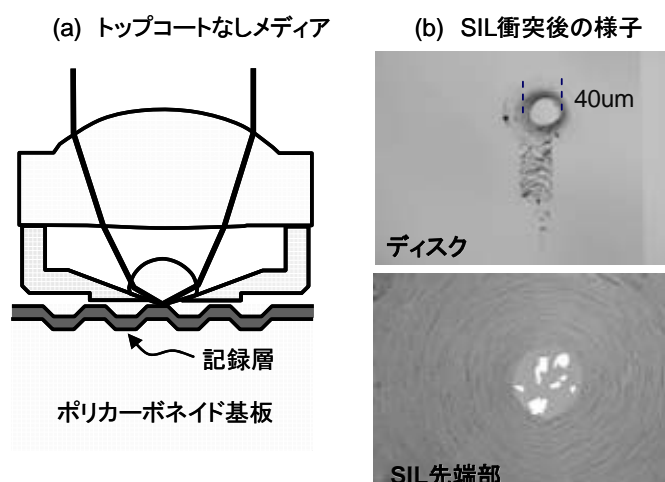


図6.5.4.1 トップコートなしディスクでの衝突試験結果
(ディスク回転数1200rpm,衝突速度 $v = 0.05\text{m/s}$)

図 6.5.4.1(a)は、トップコートがなく記録層が最表面にあるディスクに対して、ディスク回転数 1200rpm にて、衝突試験フォーマットで規定される衝突速度の半分である 0.05m/s の速度で衝突させた場合の結果である。0.05m/s の衝突速度でありながら、図 6.5.4.1(b)に示すように、ディスクの表面に SIL が衝突した後が明確についてしまっている。ディスク表面にできた穴の直径は $40\mu\text{m}$ であり、ちょうど SIL 端面の直径と合致していた。また、衝突後の SIL 端面の様子を観察すると SIL 端面にディスク最表面の材料が付着してしまっていることがわかった。

次に、近接場用トップコートについて検討した結果を示す。近接場用トップコートとしては、表 6.5.2.1 に示すような機械的要件を満足する以外に、式(6.5.2.1)の光学的要件を満足する必要がある。ところが、単一材料で式(6.5.2.1)を満足する、つまり屈折率が 1.84 以上の物質を実現するのは現実的には困難である。低屈折率の材料をバインダーとして、その中に高屈折率の粒子を混ぜた材料にて実現した[10]。粒子のバインダーへの充填率を最適化することで、近接場光ディスクシステム用のトップコートとして屈折率 $n=1.84$ 以上を実現するものを開発して、衝突試験を行った。なお、粒子の大きさは、ディスク側にカップリング入射した近接場光の波面に影響がないようにしている。また、トップコートの厚さは、波面収差補正を補正許容範囲の観点から $1\mu\text{m}$ 以下としている。トップコート付き近接場光ディスクの構造を図 6.5.4.2 に示す。

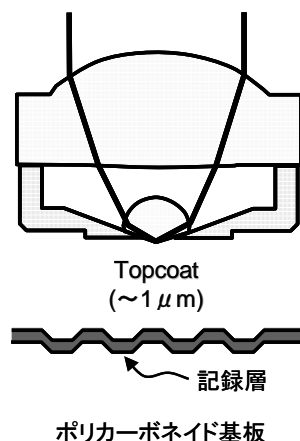


図6.5.4.2 近接場光記録再生用トップコート

図 6.5.4.3 に近接場光記録再生用トップコート材料についての衝突試験結果を示す。衝突試験では、ディスク回転数 1200rpm において、SIL 衝突速度を変えて衝突試験を行い、衝突後のギャップエラー変動振幅を調べた。

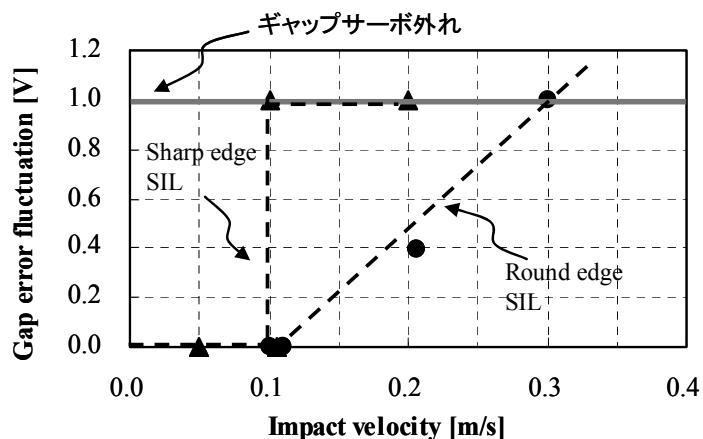


図6.5.4.3 衝突試験結果(1,200 rpm)

この実験に用いたトップコートは、厚さが $1\mu\text{m}$ 、屈折率が 1.84 のナノコンポジット膜であり、式(6.5.2.1)で示した光学要件は満足している。衝突前のギャップサーボ試験においては、安定してギャップサーボがかかり、トップコートの表面性は問題なかった。図 6.5.4.3 の結果より、このトップコートは、ディスク回転数 1200rpm、衝突速度 0.1m/s において、衝突後においてもギャップエラー振幅変動はないことから、衝突ロバスト性を満足しうると認められた。このときのディスク表面と SIL の様子を図 6.5.4.4 に示す。

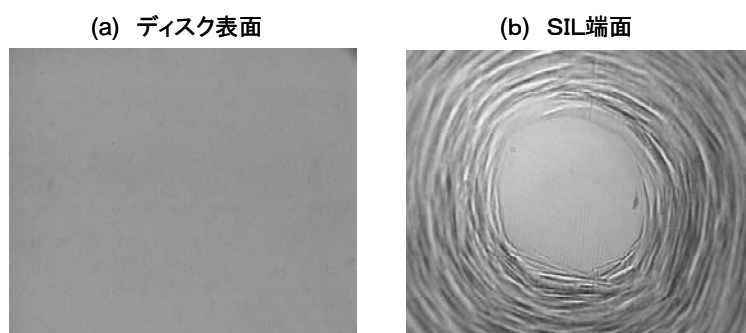


図6.5.4.4 衝突試験結果
(ディスク回転数1200rpm、衝突速度 $v=0.1\text{m/s}$)

しかしながら、衝突速度が 0.1m/s であってもディスクの損傷が起り、ギャップサーボが破綻し外れてしまい、SIL エッジ端面も汚染する場合があることがわかった。図 6.5.4.5 に実験例を示す。

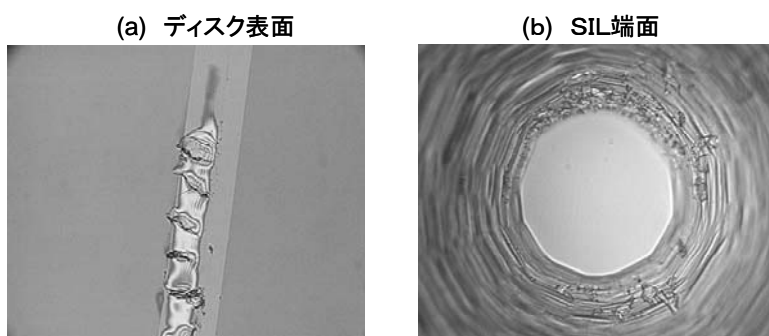


図6.5.4.5 衝突試験結果
(ディスク回転数1200rpm、衝突速度 $v=0.1\text{m/s}$)

この結果から、図 6.5.4.4 に示すトップコートは、衝突試験条件を満足しうるものの、SIL の衝突具合によっては直ちにディスクを破損しうる傾向があることから、トップコートの表面性が脆弱である傾向があることがわかった。実用的には、堅牢さも重要であるが、同時に脆弱でないことも必要である。トップコートの堅牢さを損なうことなく、脆弱さを改善できる手法が求められるが、実験的に、SIL 端面のエッジを丸めることで手法が有効であることが実験的にわかった[9]。通常の SIL とエッジを丸めた SIL との比較を図 6.5.4.6 に示す。

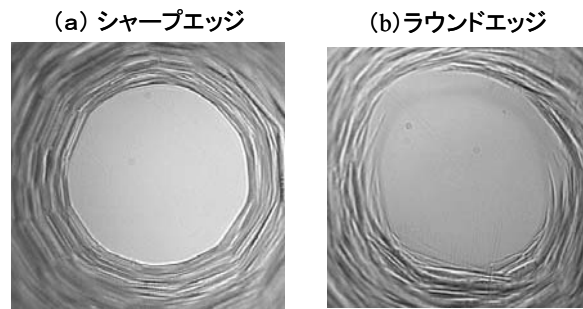


図6.5.4.6 SIL端面のエッジ形状の違い

図 6.5.4.6(a)は通常の SIL 端面形状であり、SIL のエッジがシャープである。一方、図 6.5.4.6(b)の SIL は端面のエッジが丸くなっている。エッジがラウンドしている SIL を用いた場合の衝突試験結果を図 6.5.4.3 に併せて示してある。図 6.5.4.3 より、エッジがラウンドしている SIL を用いることで、衝突速度が 0.1(m/s)を超えても直ちにギャップサーボが破綻する問題が解消されており、衝突速度が 0.3(m/s)までギャップサーボが破綻しないことがわかった。

次に、このトップコート、ラウンド SIL を用いて、最終目標であるディスク面ぶれ $40\mu\text{m}$ 、ディスク回転数 3000rpm での衝突試験を行った。衝突速度 0.1m/s にて衝突試験を行った後のギャップエラー信号、ディスク表面の様子を図 6.5.4.7 に示す。

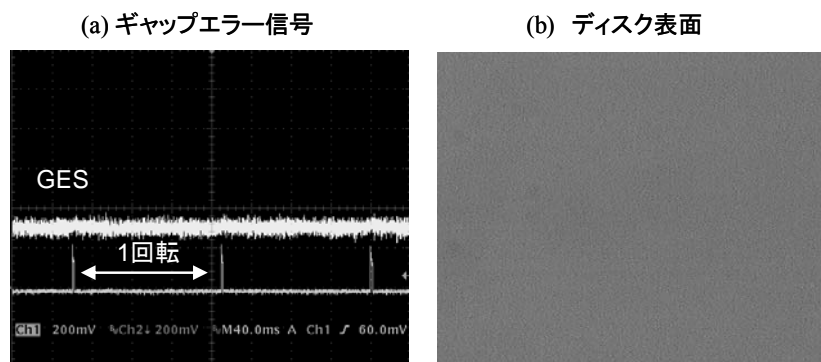


図6.5.4.7 衝突後のディスク表面評価
(ディスク回転数3,000rpm, 衝突速度 $v=0.1\text{m/s}$)

図 6.5.4.7(a)より、衝突後であっても、ギャップエラー信号に振幅変動がないことがわかる。これは、衝突後であってもディスクに、近接場記録再生を阻害する損傷を何ら与えていないことを意味している。また、これは、図 6.5.4.7(b)に示す衝突後のディスク表面の様子を見てもわかる。

最後に、本トップコートを用いて近接場記録再生を行った結果を示す。

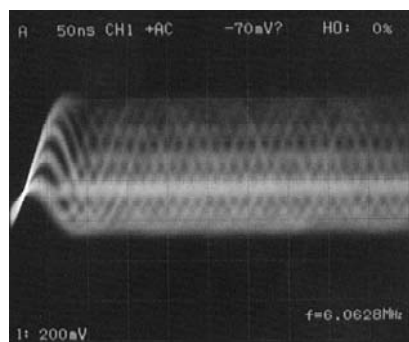


図6.5.4.8 トップコート付きディスクへの記録再生結果(100Gbyte)

トラックピッチ $0.16\mu\text{m}$ の相変化記録メディアに、ディスクサイズ 12cm で 100Gbyte 相当の密度で記録した場合の再生 RF 信号である。ジッターは、イコライザ後で 11% であった。トップコート付きメディアで、開口率 $\text{NA}=1.84$ の近接場光学系にて、100BGyte 密度の記録再生に成功したのは、これが世界初の結果である。

6.6 メカ機構によるナノギャップ安定化[11]

本節では、メカ機構によるナノギャップ安定化について述べる。

メディアに付着した指紋、粘着性のダストなどについては、エアフロー効果によっては回避できない。この場合、SIL のテーパ部にダストが衝突するため SIL が振られる可能性がある。そして、この場合、ナノギャップが維持できずに SIL 端面にこれらのダストが付着する可能性がある。この場合の SIL 端面の様子を図 6.6.1 に示す。

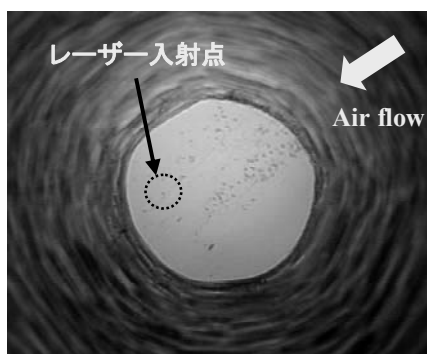


図6.6.1 SIL端面に付着したダスト

この場合、SIL 端面の汚染により入射ビームが遮られ、または、ディスクからの反射ビームが遮られ、ギャップサーボが不安定になる可能性がある。トップコートがある場合は、ギャップサーボが不安定になり SIL が衝突してもディスク表面が保護されるが、一度 SIL 端面が汚染されると、GES が、図 6.6.2 に示すように出力不良となる。

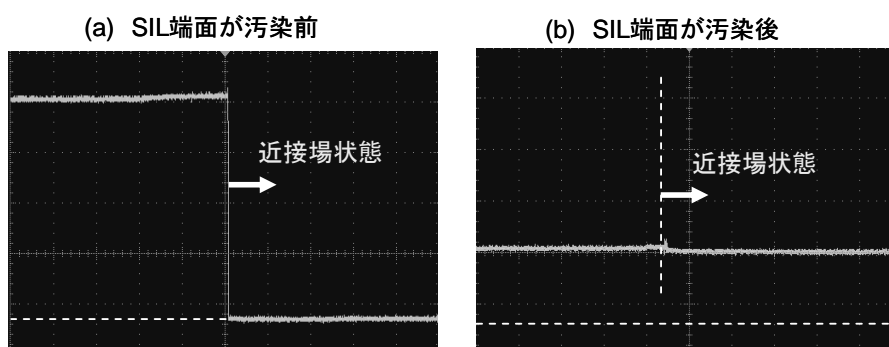


図6.6.2 SIL端面汚染前後のギャップエラー特性

つまり、SIL 端面が汚染前は、図 6.6.1(a)に示すように、GES はファーフールドで一定値、近接場状態で減少し、SIL がディスクに接触時にゼロとなり、正しい“1-0”特性が得られるのに対して、汚染後は、例えば、図 6.6.1(b)のように、汚染後と全く挙動が異なる特性が示し、正しく“1-0”特性が得られない場合がある。これは、SIL 端面が汚染されており、全反射戻り光量がきちんと得られないことが原因である。

この他、ナノギャップ効果により SIL 端面にはダストは進入せず、SIL 端面は清浄であるが、SIL のエッジにダストがたまっている場合がある。この場合を、図 6.6.3(a)に示す。

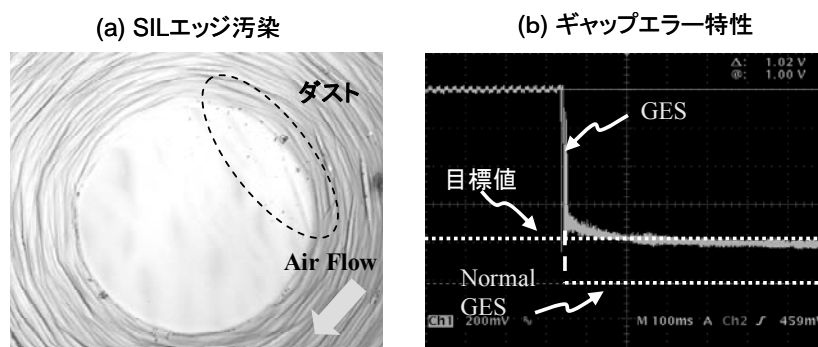


図6.6.3 ギャップサーボの繰り返し動作への影響

この場合、ギャップサーボがかかり続けている間は問題ないが、一度、ギャップサーボを停止して、再度、開始するときにギャップサーボがかからない場合がある。このときのギャップエラー特性を図 6.6.3(b)に示す。一度、ギャップサーボを停止したときに、SIL エッジ端面の積層したダストが SIL 端面に回り込み付着するか、アクティブサーボによるダスト押しつぶし効果がなくなるため、ギャップエラーは、SIL がディスクに接触時にもはやゼロとならない。図 6.6.3(b)の例の場合、接触レベルがギャップ目標値と合致しているため、この場合、もはやギャップサーボを行うことは不可能となる。

以上のような場合、SIL 端面をクリーニングしなければ、安定したナノギャップを維持することはこれ以上は不可能である。そこで、この問題に対処するため、SIL 端面をクリーニングする SIL クリーニング機構を開発した[12]。図 6.6.4 に SIL クリーニング機構を示す。

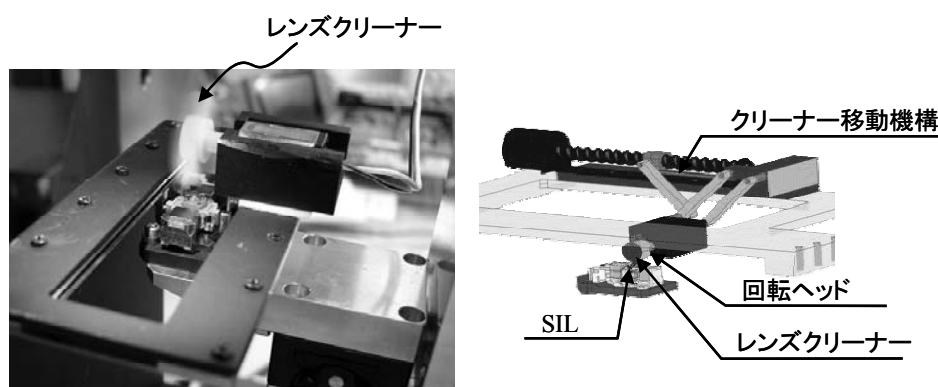


図6.6.4 SILクリーニング機構

SIL クリーニング機構には、不織布からなるレンズクリーナーが回転ヘッドに設置されている。通常は、クリーニングヘッドはSIL から離れた位置に設置されているが、システム起動時のギャップサーボを開始前、もしくは動作中においてギャップエラーをモニターしギャップサーボが外れた場合に、SIL クリーニング機構を動作させる。SIL クリーニング機構動作時には、ステッピングモーターによりクリーニングヘッドを SIL 上面に移動し、0.5gf の加重でクリーニングヘッドを SIL に押し当て、5 秒間回転させて SIL クリーニングを行う。図 6.6.5 に、SIL クリーニング機構による SIL クリーニング前後の SIL 端面の様子を示す。

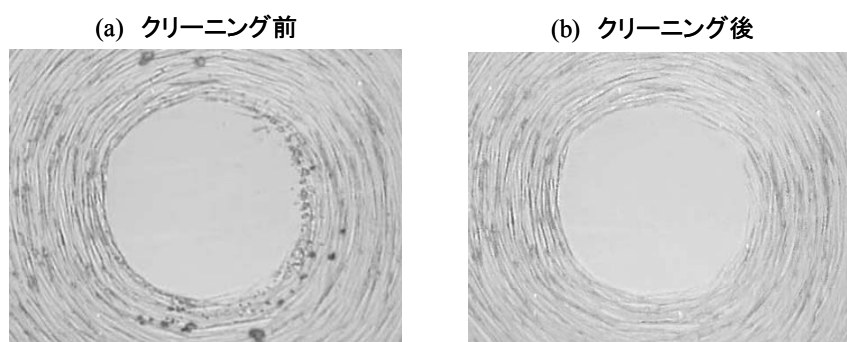


図6.6.5 SILクリーナーの効果

図 6.6.5 に示すように、SIL クリーニング機構により、SIL 端面がきれいに清浄化されていることがわかる。SIL 端面が清浄であれば、従来通りのナノギャップサーボが可能である。この SIL クリーニング機構は、ナノギャップ安定性にも寄与している。

6.7 まとめ

本章では、近接場光ディスクシステムにおけるダストロバスト化の観点からナノギャップ安定化技術について述べた。

光ディスクシステムはリムーバブルシステムであることが要求されることから、ダストが容易にシステム内に進入し、ヘッドとディスク間をナノギャップ精度に制御するにあたり、大きな障害となりうる。このため、ダストに対するナノギャップの安定化技術が要求される。この問題に対して、以下の技術を開発した。

- ① コニカル型 SIL
- ② アクティブサーボ技術
- ③ ヘッドメディアインタフェース技術

①のコニカル型 SIL では、SIL の先端形状をコニカル形状にしたレンズを近接場光ディスクシステム用に最適なものであることを明らかにした。そして、コニカル型 SIL により、SIL 周辺部に生じるエアフローの効果により、原理的にダストが SIL に接近することがなくダストに対してロバストであることを理論と実験の両面から実証した。また、これ以外に、エアフローによる SIL に対する外乱（圧力、トルク）の点、またそれに起因して生じるチルトの観点からもコニカル型 SIL が優れることも明らかにした。

②のアクティブサーボ技術では、ハードディスクと異なり、ギャップをサーボにより一定に保持することでダスト外乱に対して本質的にロバストであることを明らかにした。

③のヘッドメディアインタフェース技術では、ハードディスクと異なり、ディスクとナノギャップで対向している部分が一様にディスクに対して接しており、しかも $40\mu\text{m}$ と非常に微小であることからダスト外乱に対して本質的にロバストであることを明らかにした。

以上、①～③を備える SIL 型近接場光ディスクシステムはダストに対してロバストなシステムであることを実証した。

また、想定外の多くのダストやメディア上に付着したダストがある場合や、外部振動がシステムに加わるなどして、SIL がディスクに衝突する場合に対して、ディスクの記録層を保護するトップコートを提案した。トップコートとしては、メカ的要件として、ディスク回転数 3000rpm、ディスク面ぶれ量 $40\mu\text{m}$ の条件下で 0.1m/s の速度で SIL がディスク衝突しても記録層が破壊されないこととした。また、光学的な要件として、トップコートの屈折率が SIL の開口率以上であることとし

た。メカ的要件を満足させるための試験用に衝突試験機を開発し、ギャップエラーでナノ精度にてディスク表面の衝突ダメージを評価する手法を明らかにした。光学要件を満足させるために、ナノコンポジット材料による屈折率 1.8 以上のトップコートの開発に成功し、トップコート付きディスクに対して、世界で初めて 100Gbyte 相当の記録に成功した。

また、SIL がひどくダストで汚染された場合の対策として、SIL クリーニング機構を開発した。

以上の技術により、ダストに対してロバストにナノギャップを維持し、安定した近接場光ディスクシステムが可能であることを実証した。

参考文献

- [1] T. Ishimoto, T. Ito, M. Shinoda, K. Saito, T. Kondo, T. Matsui, S. Kim, A. Nakaoki and M. Yamamoto, “Head Analysis in an Air Flow on a Near Field Optical Disk System with a 2-Axial Actuator”, Jpn. J. Appl. Phys. 44, No.5B, pp. 3410-3411 (2005)
- [2] M. Shinoda, K. Saito, T. Kondo, T. Ishimoto, A. Nakaoki, “High-Density Near-Field Readout over 50GB Capacity Using Solid Immersion Lens with High Refractive Index”, Jpn. J. Appl. Phys. 42, Part 1, No.2B pp. 1101-1104 (2003)
- [3] I. Ichimura, K. Kishima, K. Osato, K. Yamamoto, Y. Kuroda, and K. Saito, “Near-Field Phase-Change Optical Recording of 1.36 Numerical Aperture”, Jpn. J. Appl. Phys., **39**, No.2B, pp.962-967 (2000)
- [4] S. Imanishi, T. Ishimoto, Y. Aki, T. Kondo, K. Kishima, K. Yamamoto and M. Yamamoto, “Near-Field Optical Head for Disc Mastering Process”, Jpn. J. Appl. Phys. 39, Part 1, No.2B pp. 800-805 (2000)
- [5] T. Ishimoto, T. Matsui, S. Kim, K. Saito, K. Takagi, S. Haga, A. Nakaoki and M. Yamamoto, “Technologies for Removability in a Near-Field Optical Disc System”, Proc. SPIE, 6282 C1-C10 (2006)
- [6] 石本 努、“光ディスク装置及びサーボ制御方式”、特許願 0690198702
- [7] 岡村博司、“ハード・ディスク装置の構造と応用”、CQ 出版、pp.53 (2002)
- [8] T. Yamasaki, T. Yukumoto, K. Sunmin, T. Ishimoto, A. Nakaoki, F.K. Bruder, R. Oser, and K. Hildenbrand, “Evaluation of Top Coated Media for Near-Field Optical Disc System of NA 1.84”, Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory, pp.284-285 (2006)
- [9] T. Ishimoto, S. Kim, A. Nakaoki, T. Mizuguki, T. Kondo, and O. Kawakubo, “Reliability for Lens Impact against Phase Change Recording Layer in a Near-Field Optical Disk Drive System”, Proc. of the 19th Symposium on Phase Change Optical Information Storage, pp.27-30 (2007)
- [10] 齊藤公博、中沖有克、“光記録媒体及び光記録再生方法”、特許公開番号 2006-344347
- [11] 金 善敏、石本 努、松井 健、“光ディスク装置、レンズクリーニング装置、クリーナー及びレンズクリーニング方法”、特許公開番号 2007-280586

第7章 ナノギャップサーボ技術による記録再生評価

7.1 はじめに

本章では、前章までに述べてきたナノギャップ技術を用いて、近接場記録再生を行った結果について述べる。近接場光ディスクシステムでは、ディスクと対物レンズである固体浸レンズ（Solid Immersion Lens; SIL）との距離を近接場光が生じる 25nm 程度に保持することで、1 以上の開口率を有する近接場光をディスク側に照射させる。この結果、当該近接場光によりディスクに照射する光スポットを微小化し、高密度に信号を記録再生が可能となる。

はじめに、近接場記録再生を行うディスク仕様について述べ、次に、記録時のギャップサーボ安定化に優れる 2 つの波長を用いた近接場記録再生システム、及び近接場記録再生結果について述べる。次に、2 ビームレーザーを用いた近接場記録再生システム、及び 2 ビームレーザーによる近接場記録再生結果について述べる。最後に、ローディング動作を備えるリムーバブル近接場光ディスクシステム、及び当該システムによる近接場動作結果を述べる。

7.2 ディスク仕様[1][2][3][4]

近接場記録再生に用いたディスクは、記録可能（ReWritable ; RW）と再生専用（Read Only Memory; ROM）の 2 種類である。RW ディスクの構成、ROM ディスクの構成を図 7.2.1 に示す。

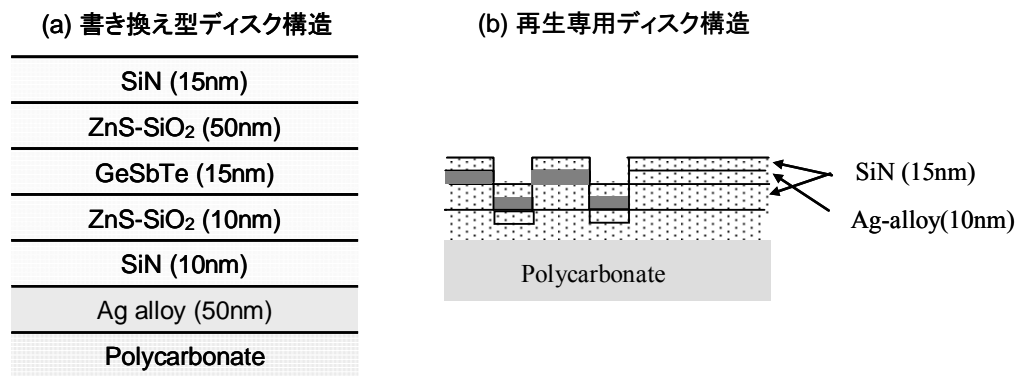


図7.2.1 近接場記録再生用ディスク構造

RW ディスク、ROM ディスクともに、ディスク基板としては、基本的には従来の CD、DVD 等にて光ディスクシステムと同様に 1.1mm の厚さのポリカーボネイト基板を用いている。RW 基板では、記録材料として図 7.2.1(a)に示すように相変化材料を用いており、表面に SiN を形成して平滑化してある。記録膜の厚さは合計 150nm である。一方の ROM 基板では、反射膜として銀合金を用いており、RW 基板と同様に表面に SiN を製膜して平滑化している。反射層の厚さは合計 40nm である。トップコートを用いる場合は、これらの膜の最上面に§6.5 で述べたトップコート（厚さ約 1 μm）を塗布している。

ディスク基板へのマスタリングは、電子ビーム露光(Electron Beam Recording; EBR)装置[2]、または相変化マスタリング（Phase Transition Mastering ; PTM）露光装置[4]によりグループ、もしくはピットを形成している。EBR は、従来のレーザービームによるガラス基板に塗布した有機レジストによる露光現象によるものではなく、Si ウェハ原盤に電子ビームを照射することによるマスタリング手法であり、従来のレーザービーム露光よりもさらに高解像度マスタリングが可能である。PTM は、従来と同様にレーザービームを用いて露光するが熱モードによる露光を行うもので、従来のフォトンモードによる露光方法と比べて、さらに高解像度マスタリングが可能である。

EBR による ROM ディスク、RW ディスクのマスタリング例を図 7.2.2 に示す。

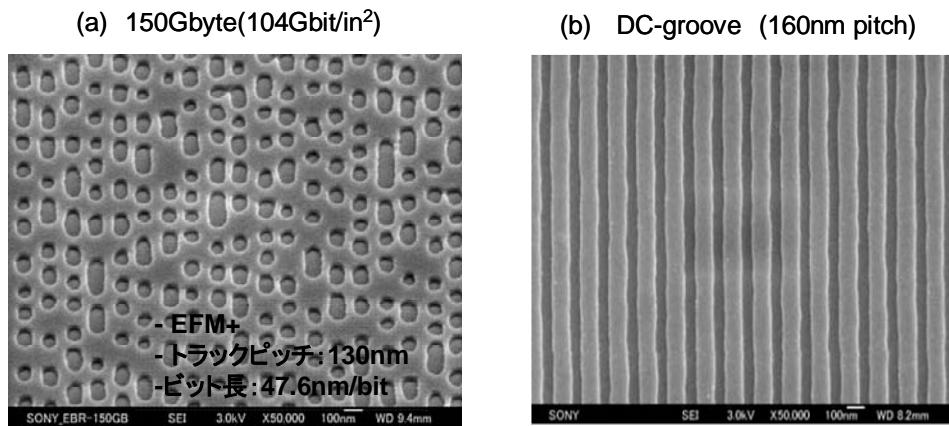


図7.2.2 EBRによるROMディスク、RWディスク

図 7.2.2 に示すように、EBR により 150Gbyte の ROM ディスク、Blu-ray ディスクのグループピッチの半分の 160nm でのグループのマスタリングに成功している。また、図 7.2.3 に PTM による ROM ディスク、RW ディスクのマスタリング例を図 7.2.3 に示す。

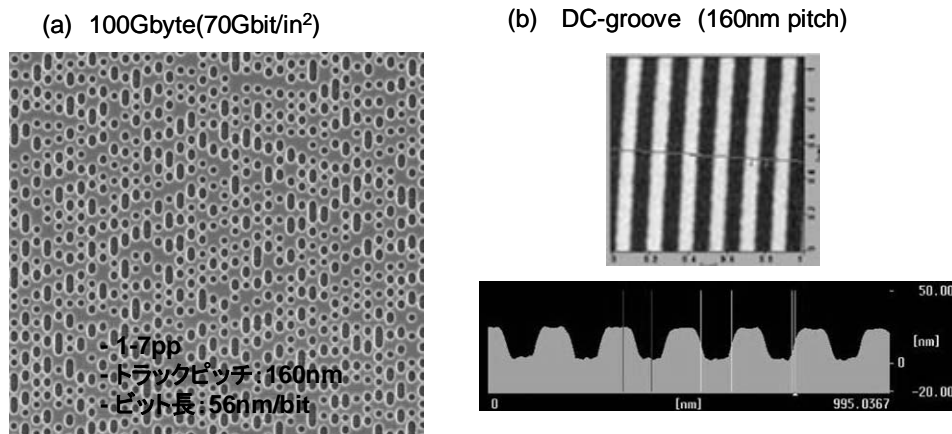


図7.2.3 PTMによるROMディスク、RWディスク

図 7.2.3 に示すように、PTM においても 100Gbyte の ROM ディスクのマスタリング、グループピッチ 160nm の RW ディスクのマスタリングに成功している。

以上、図 7.2.2、図 7.2.3 のように EBR、または、PTM にてマスタリングされた基板から Ni スタンパーを作製し、ポリカーボネイド基板に成形する。図 7.2.4 に成形例を示す。

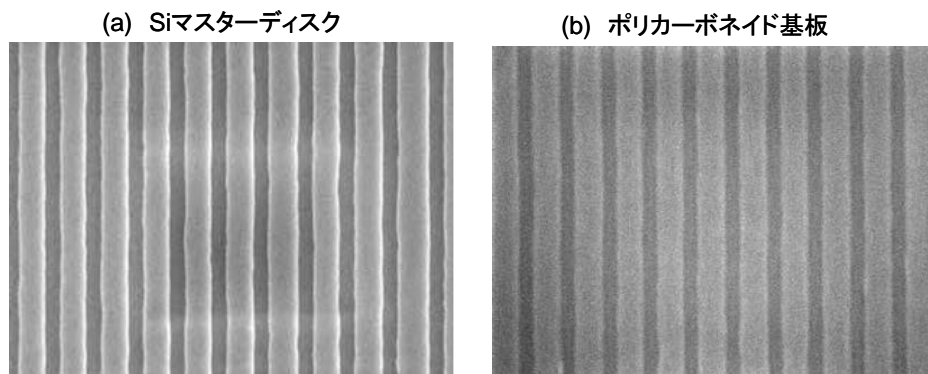


図7.2.4 ポリカーボネイド基板への成形例

図 7.2.4 は、グルーブピッチ 160nm、グルーブ深さ 20nm の場合の成形例であるが、Si マスターディスクよりポリカーボネイト基板にグルーブがうまく転写されていることが確認できる。ROM ディスクも同様にポリカーボネイト基板に転写される。グルーブもしくはピットが転写されたポリカーボネイト基板に図 7.2.1 に示す記録層、または反射層を製膜することで、高密度RWディスク、またはROMディスクが得られる。近接場記録再生実験では、このようにして得られたディスクを用いて行う。

7.3 近接場記録再生システム[5]

7.3.1 システム概要

近接場記録再生システムの外観を図 7.3.1.1 に示す。

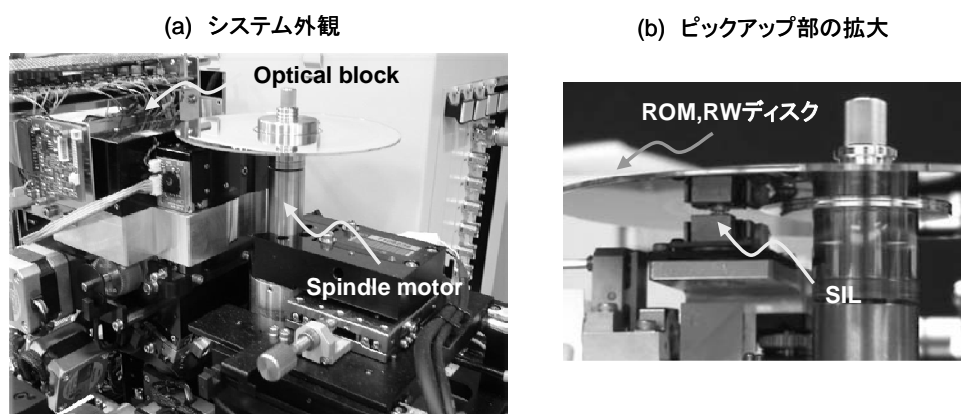


図7.3.1.1 近接場記録再生システム

近接場記録再生システムは、通常のオフィス環境下に設置されているが、第6章で述べているダストロバスト化技術により、SIL とディスク間の距離は、25nm 程度であるのにも関わらず、問題なくナノギャップを維持しており、オフィス環境下での安定な近接場記録再生動作を実現している。図 7.3.1.2 に光学ブロック図を示す。

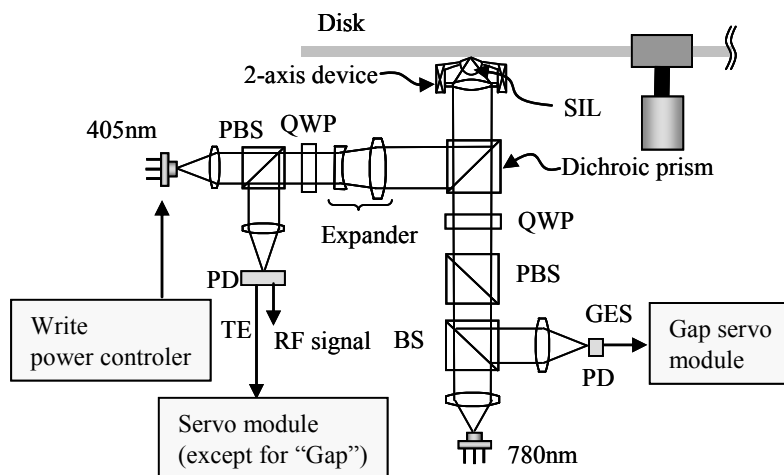


図7.3.1.2 ニアフィールド記録再生システムの光学ブロック図

近接場記録再生システムでは、記録再生用のレーザーとギャップサーボ用のレーザーの2つを用いた2波長レーザーシステムとなっている。記録再生用のレーザーとしては、波長405nmの青紫色レーザーダイオードを用いる。ギャップサーボ用レーザーとしては、波長650nmの赤色レーザーを用いる。また、対物レンズは、記録再生レーザー波長405nmにおいて屈折率 $n=2.075$ のガラス材料からなるSILと開口率 $NA=0.427$ の非球面レンズを組み合わせることで、実効的なNAが1.84のシステムを実現している。トラッキング信号、RF信号は、通常の光ディスクシステムと同様に記録再生用レーザーをディスクに照射した反射光から得られる。トラッキングエラー信号(Tracking Error Signal; TES)は、通常の光ディスクシステムで用いられているプッシュプル法[6]により得られ、フィードバックサーボによるトラッキングサーボが行われる。これは、通常の光ディスクシステムと全く同様な動作である。一方のギャップサーボは、赤色レーザーを用いてSIL端面における全反射戻り光量によりギャップエラー信号(Gap Error Signal; GES)を検出しフィードバックサーボにより、SILとディスク間を20nm程度に一定にギャップが保持される。これは、第3章で述べた通りである。

図7.3.1.3に2波長レーザーによるギャップサーボ安定動作結果について示す。

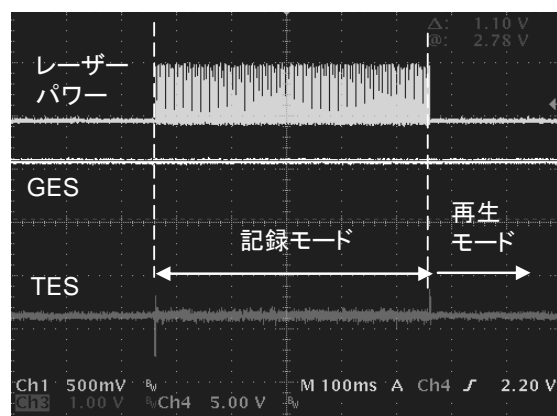


図7.3.1.3 記録再生モードでのギャップサーボ安定性

図7.3.1.3に示すように、記録時には再生パワーよりも大きいパワーがディスクに投入される。このため、GESは、記録時においてレーザーパワー出力の変化だけ大きくなって観察される。このため、再生時と記録時とでギャップエラー値が変動してしまい、安定したギャップサーボが困難になる。そこで、本研究における近接場記録再生システムでは、記録再生レーザーとギャップサーボ用レーザーを互いに分離することで、記録再生に依存せずギャップサーボ用レーザーパワーが常に一定になるようにした。この結果、図7.3.1.3に示すように、記録時においてレーザーパワーが変化しても、GESは変動することなく一定のままとなっている。なお、TESについては、通常の光ディスクシステムと同様にRF信号振幅とTES振幅がレーザーパワーに比例することを利用して、RF信号振幅により規格化することで、レーザーパワー変化の依存性を回避している。

また、記録層、またはピット面へのフォーカスは、図7.3.1.2に示すエキスパンダレンズを調整することで合わせている。ギャップサーボによりSIL端面とディスク間が、一定に保持されているので、一度フォーカスを調整すればよく、フォーカスサーボは基本的には不要である。また、再生パワーはSIL入射パワーで、0.2mW程度、記録ピークパワーは5mW程度である。近接場光へのカップリング効率は40%となっている。

7.3.2 記録再生結果

まず、図 7.3.2.1 に、Blu-ray ディスクの倍速に相当する 72Mbps の転送レートにて近接場記録再生し、112Gbyte を達成した結果を示す。

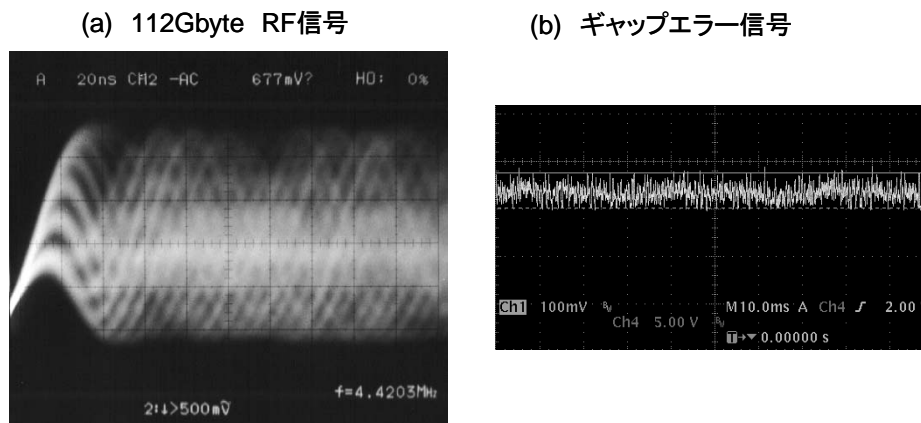


図7.3.2.1 112Gbyte 近接場光記録再生実験結果(72Mbps)

ビットエラーレートは 1.0×10^{-4} であり、十分に低い値での近接場記録再生に成功している。また、この時の残渣ギャップエラーは4nmPP以下であり、安定なギャップサーボを実現している。

図 7.3.2.2 は、Blu-ray ディスクの3倍速に相当する 108Mbps の転送レートにて近接場記録再生した 108Gbyte 容量を達成した結果を示す。

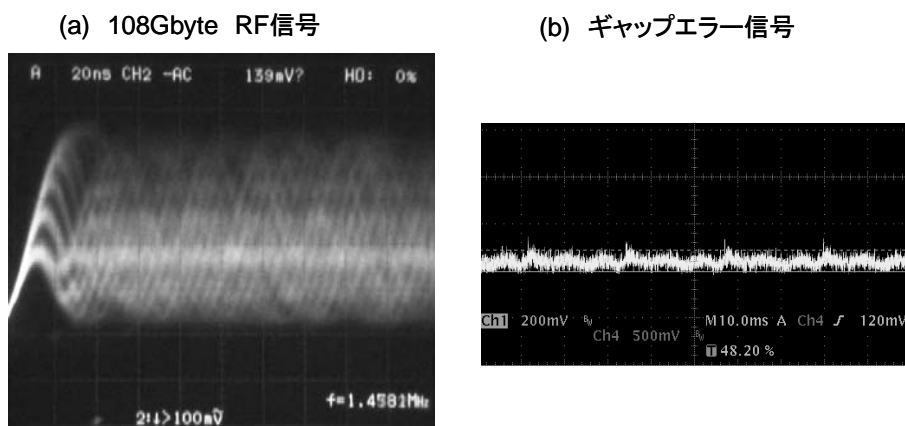


図7.3.2.2 102Gbyte 近接場光記録再生実験結果

108Mbps による近接場光記録再生に成功しており、残渣ギャップエラーは5nmPP以下であり、安定なギャップサーボを実現している。

図 7.3.2.1、図 7.3.2.2 の結果から、近接場光ディスクシステムにより、12cm サイズで 100Gbyte 以上、データ転送レートが 100Mbps を実現できることが世界で初めて実証できた。Blu-ray 以降の次世代光ディスクシステムとして § 1.2 で述べたような様々な手法、技術が検討されているが、容量 100Gbyte 以上、転送レート 100Mbps 以上を実際に達成しているのは、本研究による近接場光ディスクシステムだけである。

その他の実験例として、図 7.3.2.3 に、50Gbyte～125Gbyte の記録容量で近接場記録再生した結果を示す。

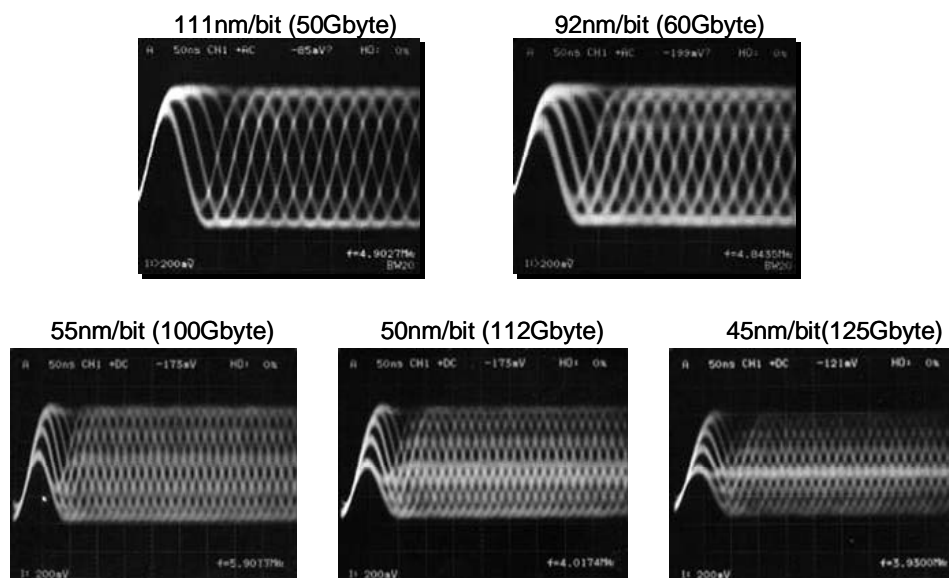


図7.3.2.3 近接場光記録再生結果 (50Gbyte~125Gbyte)

いずれの容量においても問題なく、近接場記録再生が行われていることが確認できる。また、上記を含めて記録再生した実験した得られた RF 信号から変調度(最長マークと最短マークの振幅比)を計測し、SIL による実現開口率 1.84 及び記録再生レーザー波長 405nm で決まる変調伝達関数 (Modulation Transfer Function; MTF) [7]と比較した結果を図 7.3.2.4 に示す。

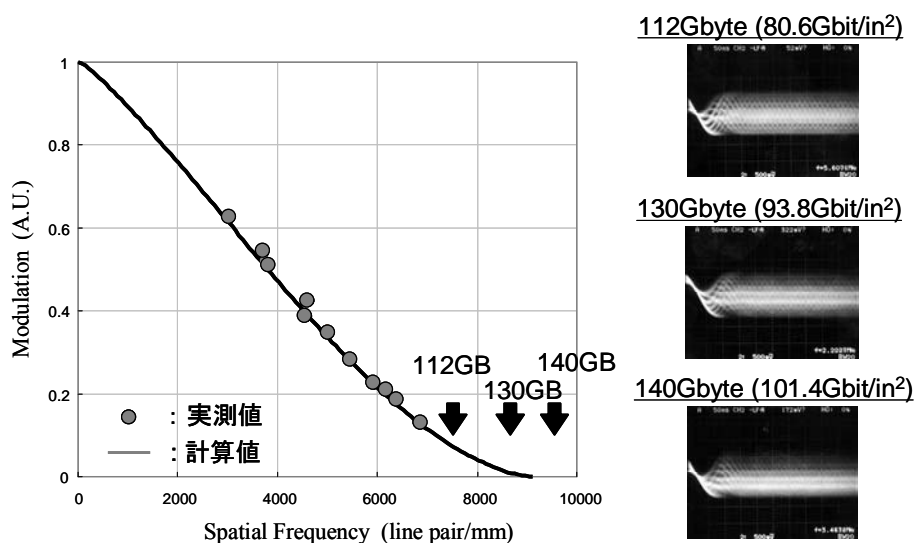


図7.3.2.4 ニアフィールド記録再生による実現開口率

図7.3.2.4より、本研究でも用いている近接場光ディスクシステムは開口率1.84を満足しており、従来の光ディスクシステムにおける回折限界の開口率1を超えるシステムが実現できていることが実証された。

図 7.3.2.5 に、近接場光による、100Gbyte 容量 (55nm/bit) にてオーバーライトした結果を示す。

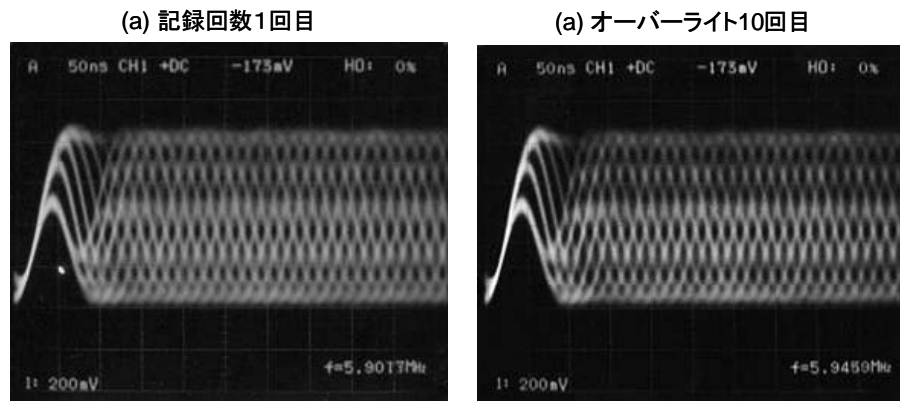


図7.3.2.5 近接場光によるオーバーライト結果

図 7.3.2.5(a)は、1回目の記録、図 12(b)は 10 回オーバーライト後の結果である。図 7.3.2.5(a)に示すように、近接場においても、通常の光ディスクと同様にオーバーライトが可能であることが実証された。

図 7.3.2.6 は、100Byte 容量の ROM を再生した結果である。

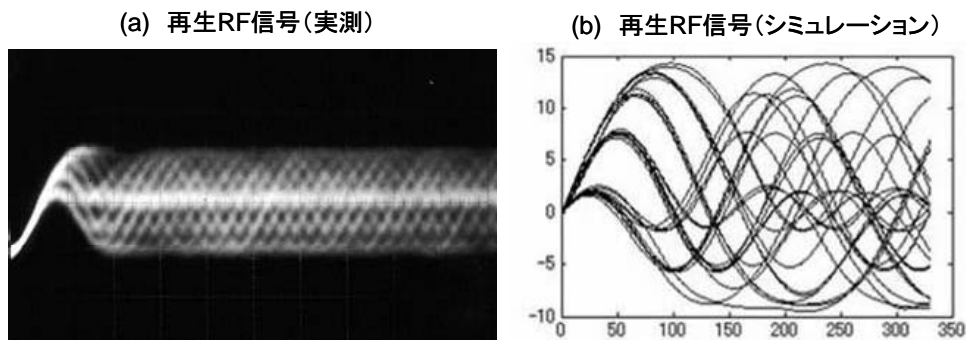


図7.3.2.6 100Gbyte ROMディスクの近接場光再生結果

図 7.3.2.6 に示すように、近接場光再生によりシミュレーション値と同等な RF 信号が得られており、NA=1.84 による 100GByte ROM ディスクの近接場再生が実証できた。なお、ジッター値は 10%であった。

図 7.3.2.7 は、近接場光再生動作の繰り返し安定性を示すものである。

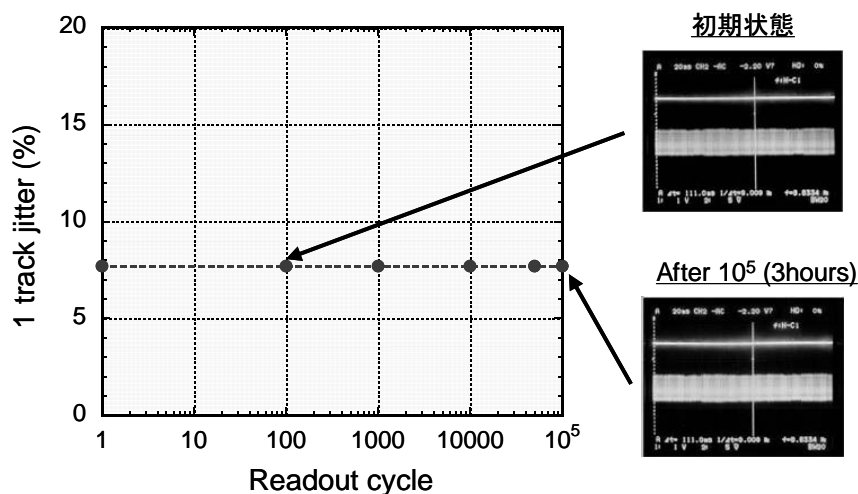


図7.3.2.7 近接場光再生動作の繰り返し安定性

本実験では、通常のオフィス環境下でギャップサーボを行った状態でディスクを回転させておいたときの再生 RF 信号のジッター値の変化を調べたものである。図 7.3.2.7 に示すように、3 時間経過後でも、初期の状態と同じジッター値を保持しており、近接場状態にてレーザーをディスクに照射し続けても問題なく、また、ギャップサーボも安定であり、ナノギャップを保持し続けることができた。

なお、以上の結果は、トップコートなしでの近接場記録再生結果であったが、トップコートがある場合の近接場記録再生にも成功しており、§ 6.5.4 図 6.5.4.8 に示す通りである。

7.4 2 ビーム記録再生システム[8]

7.4.1 システム概要

従来の光ディスクシステムにおいて、記録再生用レーザービームを複数化（マルチビーム化）して高転送レート化を図るシステムが提案されている[9][10][11][12]。ビームをマルチビーム化することで、ディスク回転数を上げることなく、データ転送レートを上げることが可能である。ディスク回転数の高速化を抑制できる点で、近接場光ディスクシステムにも有効であると考えられる。

図 7.4.1.1 に 2 ビーム近接場光ディスクシステムの外観を示す。本システムは、§ 7.3 で述べたシステムと基本的には同様であるが、記録再生用の半導体レーザーが 2 ビーム化してある点が特徴的である。

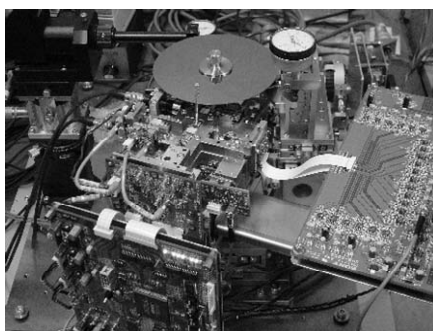


図7.4.1.1 2ビーム近接場光記録再生システム

また、図 7.4.1.2 に、本システムの光学ブロック図を示す。

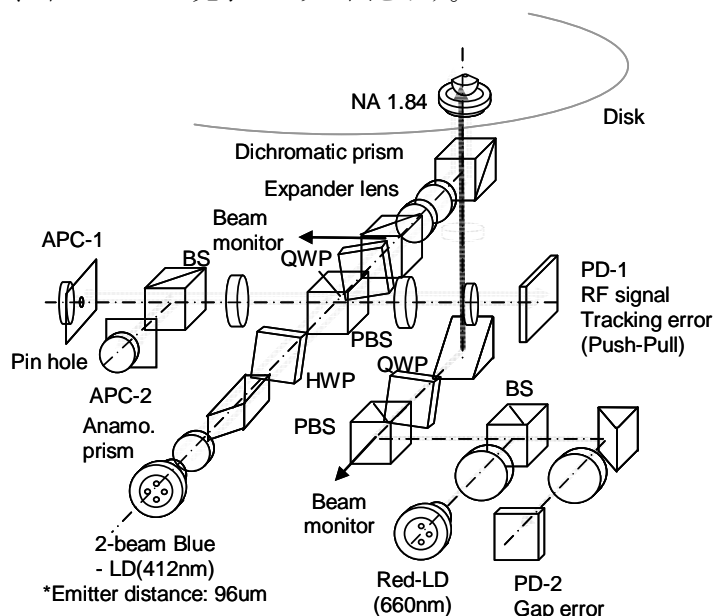


図7.4.1.2 2ビーム近接場光ディスクシステムの光学ブロック図

図 7.4.1.2 に示すように、光学ブロックについても基本的には § 7.3 で述べた近接場記録再生システムと同様であり、実効的な NA は 1.84 である。本システムにおいて特徴的なのは、記録再生用の青紫色レーザーとして、新規に開発したモノリシック 2 ビームレーザーを用いていることである。この 2 ビームレーザーの波長は 412nm であり、半導体レーザー素子端面から 96 μm ピッチで 2 つのレーザーが同時に出射する。図 7.4.1.3 に SIL 端面における 2 ビームレーザーの入射光の様子を示す。

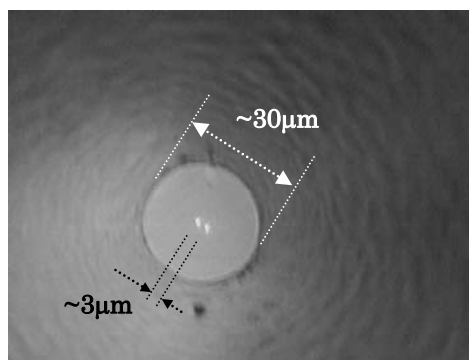


図7.4.1.3 SIL端面における2ビーム出射光の様子

2 ビーム半導体レーザーから 96 μm 間隔で出射したレーザーは、SIL 端面に 3 μm 間隔で入射するように光学調整されている。図 7.4.1.3 によれば、直径 30 μm のコニカル型 SIL 端面に 2 ビームが、設計値通りに 3 μm 間隔で照射されていることが確認できる。この SIL 端面に照射した 2 ビームにより、2 チャンネルの信号を同時に近接場記録再生する。なお、ギャップサーボについては、図 7.4.1.2 に示すように、記録再生用の 2 ビームレーザーと別個に組み込んだる波長 660nm の赤色半導体レーザーにて行っている。

また、ディスク上での 2 ビームの照射位置を図 7.4.1.4 に示す。

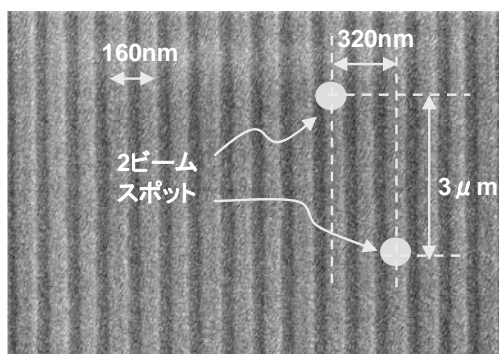


図7.4.1.4 2ビームのディスク上での照射位置

図 7.4.1.4 に示すように、2 ビームによる近接場記録再生実験では、グルーブピッチ 160nm のディスクを用いて、2 ビームをディスク半径方向に 320nm、ディスク周方向に 3 μm 離して照射するようにしている。これは、2 ビームを近接配置すると、記録再生時に隣接トラックまで記録再生してしまうクロスライト、クロスリードの影響を抑制するためであり、実験的に配置位置を決めたものである。

7.4.2 記録再生結果

図 7.4.2.1 に 2 ビーム近接場記録再生結果を示す。

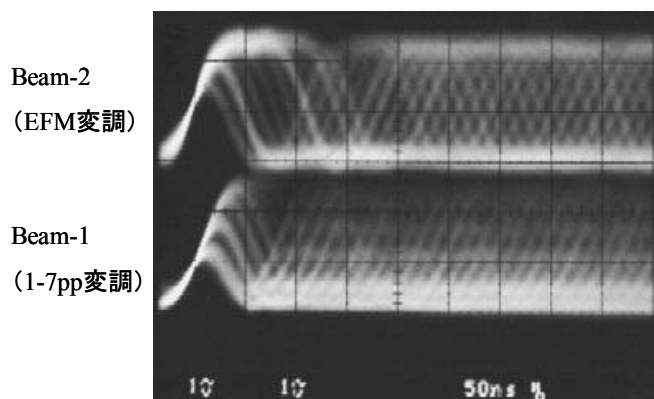


図7.4.2.1 2ビーム近接場光記録再生結果(80Gbyte)

この実験では、互いに異なる変調方式を用いて、2 ビームにて同時に記録再生した結果である。一方のビームは最短マーク長が 3T (T: クロック時間幅) である EFM 変調方式、他方のビームは最短マーク長が 2T である 1-7pp 変調方式で記録再生した結果である。記録容量 80Gbyte、データ転送レート 36Mbps 相当である。図 7.4.2.1 に示すように、2 ビームにて同時に近接場記録再生に成功している。

2 ビーム近接場光ディスクシステムでは、ディスク回転数を増大させることなく転送レートを 2 倍にできる利点がある。図 7.4.2.1 の実験では、ディスク回転数は 950rpm であるが、これは、1 ビームでの近接場光ディスクシステムにおけるディスク回転数 1900rpm に相当し、半分の回転数にて同等の転送レートを実現可能である。転送レートを上げる手法として、§ 3.4 で述べたようにギャップサーボシステムを高性能化する手法に加えて、このようにマルチビーム化による高転送レート化は有効な手法であり、ハードディスクにはない光ディスクシステムに特徴的な手法であり、近接場光ディスクシステムでも有効であることが実証できた。

7.5 リムーバブル近接場光ディスクシステム[13]

7.5.1 システム概要

前節までのシステムでは、ディスクは近接場光ディスクシステムに手動で取り付けていた。本節では、システムにディスクを自動的にクランプするローディング機能を備えたリムーバブル近接場光ディスクシステムについて述べる。

図 7.5.1.1 にシステムの外観を示す。



図7.5.1.1 リムーバブル近接場光ディスクシステム

本システムは、前節までのシステムと異なり、密閉型構造をしている。図 7.5.1.2 に内部構造を示す。

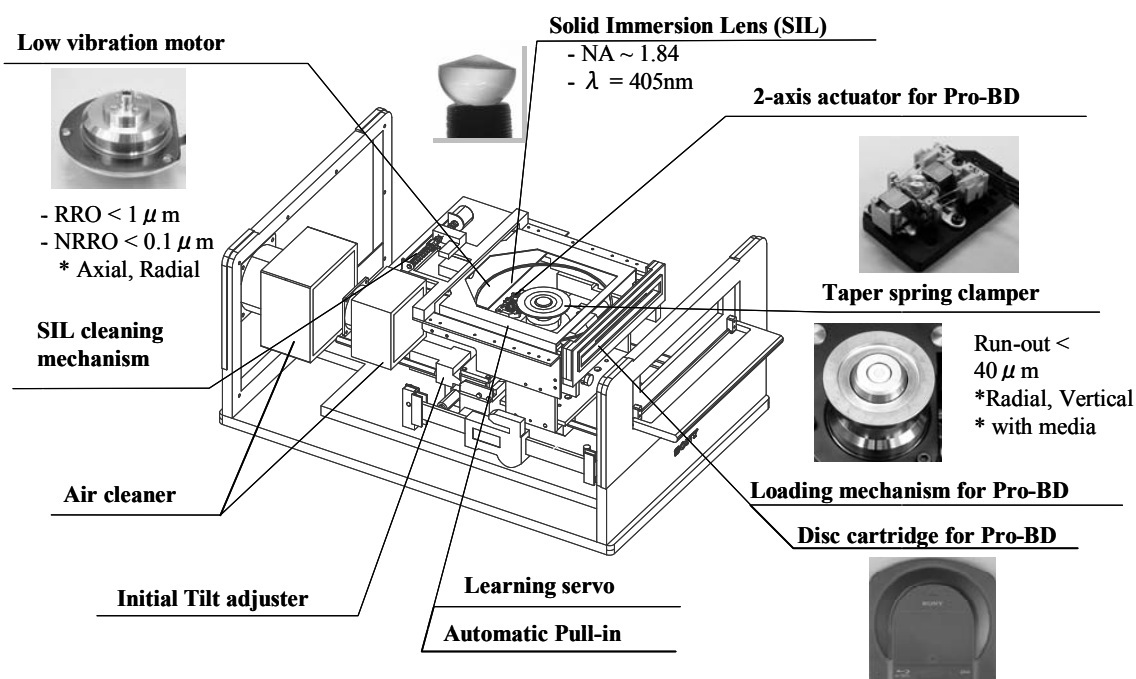


図7.5.1.2 リムーバブル近接場光ディスクシステムの内部構造

ディスクは、指紋などがディスクに付着することを防止するため、カートリッジに入れられている。カートリッジは、本研究においては、実験的に Blu-ray ディスクのものを流用して用いている。システム内部には、エアクリーナーが設置されており、カートリッジ挿入口からエアクリーナーを通して、外部に空気が排出される構造になっている。図 7.5.1.3 に内部のエアフローの様子を示す。

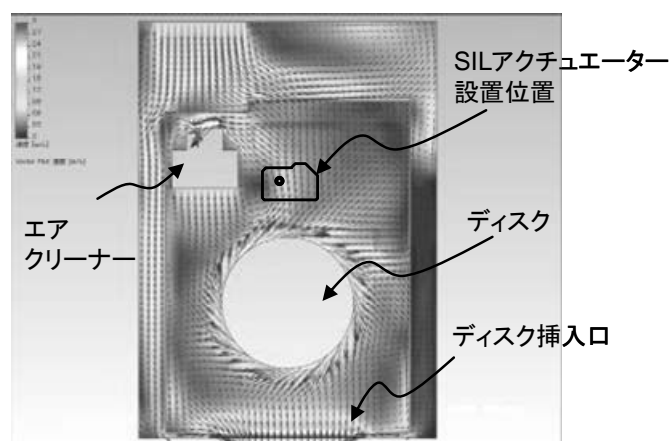


図7.5.2.3 システム内のエアフローの様子(上面図)

SIL が配置されているところに淀みがない空気流ができるように工夫されており、内部空気のクリーン度はクラス 10,000 以下に一定に保持されている。これは、空調フィルターの入ったオフィス環境下の 1/100 以下の相当するクリーン度である。

システムに挿入されたディスクは、テーパ型クランプにチャッキングされ、ディスクを含んだ状態にて、面ぶれ、偏芯共に $40\ \mu\text{m}$ 以下の抑制されている。また、スピンドルモーターは、§ 5.4.2

で述べたような近接場光ディスクシステム用のスピンドルモーターを用いており、モーター自身の繰り返し性のある振れ (Repetitive Run-Out; RRO) は、ギャップ方向、トラッキング方向ともに $1.0\mu\text{m}$ 以下となっている。また、非繰り返し性のある振れ (Non Repetitive Run-Out; NRRO) は、 $0.1\mu\text{m}$ 以下となっている。そして、第 3 章で述べた、高帯域ギャップサーボ、繰り返しサーボ、自動プライン機能、第 6 章 § 6.6 で述べた SIL クリーナー等が備えられている。近接場光学系は、§ 2.4 で述べたものと同様であり、波長 405nm の青紫色半導体レーザーを用いて開口率 $\text{NA}=1.84$ を実現するコンカル型 SIL を搭載している。

7.5.2 システム動作結果

前節で述べたリムーバブル近接場光ディスクシステムを用いて、カートリッジに入れられたディスクをロードし、近接場自動再生できることを確認した。図 7.6.2.1 に、本装置にて近接場再生された RF 信号を示す。

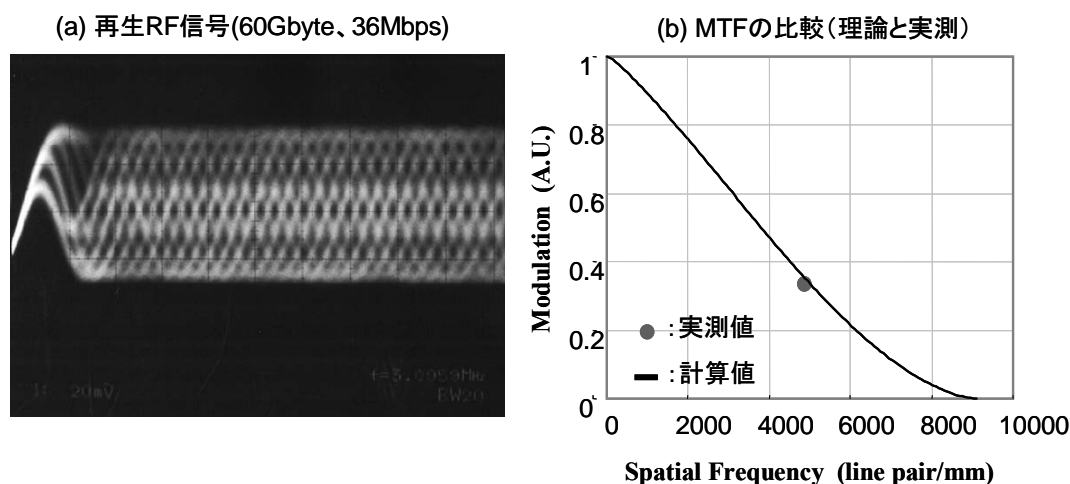


図7.5.2.1 リムーバブル近接場光ディスクシステムでのRF再生結果

図 7.5.2.1(a)に示すように、本システム内にディスクが自動ローディング後において、60Gbyte 容量の ROM ディスクの近接場光再生に 36Mbps の転送レートで成功している。また、再生された RF 信号から変調度を計測し、開口率 1.84 による理論的な MTF との比較をすると図 7.5.2.1(b)に示すように合致していることが確認できた。本実験により、開口率 1.84 を有するリムーバブル近接場光ディスクシステムの実現可能性が実証できた。

7.6 まとめ

本章では、本研究テーマである近接光ディスクシステムにおけるナノギャップ技術により安定に実現される近接場光による記録再生結果について述べた。

まず、近接場光ディスク用の記録再生ディスクとして、電子ビーム露光装置または相変化マスタリング装置により、100Gbyte 以上の記録密度を有する記録型ディスクまたは再生専用ディスクが作製可能であることを示した。そして、この高密度光ディスクに対して、近接場光により記録再生を行った。

記録再生用の近接場光ディスクシステムとして、記録再生用レーザーとギャップサーボ用レーザーを分離したシステムを開発し、安定した近接場光による記録再生が可能であることを示した。そして、近接場光により 100Gbyte 以上の容量を 100Mbps 以上の転送レートで記録再生可能であることを世界で初めて実証した。また、近接場光によるオーバーライトの結果も示し、近接場光ディ

スクは従来の光ディスクと同等の記録性能を示すことを実証した。

また、記録再生レーザーを2ビーム化した近接場光ディスクシステムを開発した。本システムでは、新規に開発したモノリシック青紫色2ビームレーザーを用いて、2チャンネルの信号を同時に近接場記録再生できることを実証した。本手法によれば、ディスク回転数を上げることなく、ビーム数だけ転送レートを上げることができ、マルチビーム化による高転送レート化手法は、近接場光ディスクシステムにおいても有効であることを実証した。

さらに、ローディング機能を備えた近接場光ディスクシステムを開発した。本システムにより、カートリッジに内蔵されたディスクに対して自動ローディングして、近接場光による信号再生が可能であることを示した。そして、レンズとディスクのギャップがハードディスク程度である光ディスクにおいて、従来の光ディスクシステムと同様にリムーバブル動作が可能であることを実証した。

参考文献

- [1] M.Furuki, M.Takeda, M.Yamamoto,K.Saito, M.Shinoda, T.Fujiki, Y.Aki, M.Koizumi, T.Miyokawa, and M.Muto, “EB Mastering Process for SIL Readout/Recording System”, Trans. Magn. Soc. Japan, **4**, 225-230 (2004)
- [2] M.Furuki, M.Takeda, M.Yamamoto, Y.Aki, H.Kawase, M.Koizumi, S.Takashima, T.Miyokawa, and N.Date,”Electron Beam Recording with a Novel Differential Pumping Head Realizing More than 50 GB/Layer Capacity Disc”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.42 pp.759-763, No.2B, Feb. 2003
- [3] A. Kouchiyama, K.Aratani, Y.Takemoto, T.Nakao, S.Kai, K. Osato, and K. Nakagawa,”High resolution Blu- Laser Mastering with Inorganic Photo-resist”, International Symposium on Optical Memory / Optical Data Storage Tech. Digest,pp.27-29 (2002)
- [4] S.Masuhara, A.Nakaoki, T.Shimouma, and T.Yamasaki, “Real Ability of PTM Proved with the Near Field”, Proc. SPIE vol.6282, 628214-1 – 628214-8 (2006)
- [5] T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "High-transfer-rate near-field writable system for a polycarbonate disc", Proc. SPIE, 5380, pp. 23-242 (2004)
- [6] 浮田宏生、“オブトメカトロニクス”、森北出版社(2001)、pp. 91-92
- [7] 中島平太郎、小川博司、“コンパクトディスク読本”、オーム社 (1988)、pp.20-22
- [8] 齊藤 公博、篠田 昌孝、石本 努、中沖 有克、山本 眞伸、“GaN 系 405nm 半導体レーザーを用いた近接場光記録再生”、レーザー研究、Vol.35,No2,pp.86-90(2007)
- [9] 徳丸春樹、“並列記録再生技術”、光学、28 巻 2 号、pp83-88(1999)
- [10] 宮澤寛、“7 ビーム並列再生光ピックアップ”光学、28 巻 2 号、pp-91-92(1999)
- [11] 佐々木憲太郎、河村紀一、徳丸春樹、桑名保宏、NHK 技研 R&D、Mo.97、pp58-69(2006)
- [12] J. Dovic, J. Wals, T. Ikkink, T. Tukker, M. Rieck, J. van Eerenbeemd, A. L.a van Voorst, and R. Rijs, ”Mult-track DVD-ROM”,Tech. Digest, Optical Data Storage, pp.112-114 (2001)
- [13] T. Ishimoto, T. Matsui, S. Kim, K. Saito, K. Takagi, S. Haga, A. Nakaoki and M. Yamamoto, “Technologies for Removability in a Near-Field Optical Disc System”, Proc. SPIE, 6282 C1-C10 (2006)

第8章 結論

本論文は、従来の光ディスクにおける回折限界を超える光学解像度を有する近接場光ディスクシステムの実現に関するものであり、特に対物レンズと光ディスクをレーザー波長以下のナノギャップに維持する技術（ナノギャップ技術）に関してなされたものである。以下、各章別に得られた結果を要約し、最後の本研究で得られた結論をまとめる。

第1章「序論」では、本研究に関する光ディスクシステムの研究開発動向、及び大容量化技術動向、及び近接場光による高密度化手法の従来の研究について俯瞰した。その結果、従来の近接場光ディスクシステムに関する研究では、ナノギャップ技術についての検討が不十分であることがわかった。そこで、本研究では、ディスク面ぶれ量の広く許容し安定したナノギャップを実現するドライバロバスト性、及びダストに対しても安定してナノギャップを実現するダストロバスト性の両面からナノギャップ技術について研究することとした。

第2章「近接場光ディスクシステム」では、近接場光ディスクシステムについての概要を述べた。本研究で用いる近接場光ディスクは、固体浸レンズ(Solid Immersion Lens: SIL)を用いて近接場光が発生するものである。そこで、ここではSILによる回折限界を超えて達成可能な光学解像度、及び、SILを光ピックアップレンズに組み込んだ近接場光ディスクシステムの概要について述べた。本研究により実現される近接場光ディスクシステムは、実効開口率が1.84を実現し、従来の光ディスクと同様にポリカーボネイト基板を用いて、通常のオフィス環境下において安定なナノギャップを実現していることを示した。

第3章「ナノギャップ技術」では、まず、光学的にSILとディスク間のギャップを計測するための手法を示した。本手法はSILをギャップセンサーとして利用することで外部のセンサーを不要とする特長を有し、光学的に検出されたエラーからナノ精度にてギャップを計測することが可能となる。次に、近接場光ディスクシステムにおけるギャップサーボについての仕様を示し、サーボシステムが満足すべきリファレンスサーボを導入した。そして、この仕様を満足するためのギャップサーボの高精度化手法を提案した。高精度化手法としては、高帯域化サーボと学習サーボを組み合わせる手法を提案した。高帯域化サーボでは、連続系で設計されたシステムを性能悪化させずにデジタル化しハードウェア実装化する工夫をし、また高域周波数域での安定度改善をすることでサーボ帯域を、世界最高レベルの13kHzまで拡張することに成功した。また繰り返しサーボを導入し、高帯域サーボと組み合わせたハイブリッドサーボにより、ディスク回転数3000rpm、ディスク面ぶれ40 μ mにおいて、ギャップ25nm、乃至20nmを5nm精度で安定維持できることを実証した。そして最後に、SILをディスクから300 μ m離れた初期位置から近接場光が発生する25nmの距離に引き込むプルイン技術について述べた。本手法では、ランプ入力による引き込み手法と、2自由度制御系による引き込み手法を提案し、引き込み時においてSILがディスクに衝突することなく、0.5秒以下で高速に安定に引き込むことが可能であることを実証した。また、これら2つの手法を組み合わせることで、自動的にSIL位置を検出し、安定に近接場状態に引き込める手法を提案し、その効果を実証した。

第4章「チルトサーボ技術」では、近接場光ディスクシステムにおいてディスク全面での記録再生動作を可能にする下記のような技術を提案した。まずSILとディスク間のナノギャップにおけるチルトを光学的に検出する手法を提案した。本手法では、ギャップエラーを利用して検出するものであり、外部センサーは不要でナノギャップ間のチルトを高精度に計測できる特長がある。次に、近接場光ディスクシステムにおけるチルトを光学検出されたチルトエラーにより見積もり、チルト

サーボ仕様を導入し、そのチルトサーボ仕様に基づいた新規のチルトアクチュエーターを提案した。その結果、提案したアクチュエーターを用いてチルトサーボを適用することによるチルト抑制効果を実証した。そして、実現されたチルトサーボによりディスク全面で面ぶれ量 $100\mu\text{m}$ を許容する近接場光ディスクシステムが可能であることを実証された。また、ナノギャップの悪化成分が周方向のチルトエラーが支配的であることを明らかにした。そして、そのチルトエラー情報を用いた新規の高精度ギャップサーボ手法を提案し、メモリを用いることなく繰り返しサーボと同等な効果が得られることを実証した。

第5章「コンポーネントによるナノギャップ技術」では、コンポーネント改善によるナノギャップ高精度化について述べた。本章では、ギャップサーボに対して外乱源であるディスク基板、スピンドルモーター、及び制御対象である **SIL** アクチュエーターに着目して、高精度化技術について述べた。ディスク基板については、ディスク共振に着目し、近接場光ディスクで初めて顕在化してくるディスク共振現象について述べ、ギャップサーボ性能を悪化させている一因がディスク共振であることを実証した。その結果、ディスク基板を改善することで共振抑制し、ギャップサーボ性能を改善できることを実証した。また、**SIL** アクチュエーター、スピンドルモーターについては、近接場光ディスクシステムで要求される仕様を示し、制御対象である **SIL** アクチュエーター、及び外乱源であるスピンドルモーターの動特性を改善することで、ギャップサーボ性能の改善を図れることを実証した。

第6章「ダストロバスト化によるナノギャップ技術」では、**SIL** とディスクとのインタフェースの観点からナノギャップを安定化する技術について述べた。まず、**SIL** の先端形状を工夫することで**SIL**先端部のエアフローの効果により原理的にダストに対してロバスト化できることをシミュレーション、実験結果の両面から実証した。次に、アクティブサーボによるナノギャップ安定化、**SIL** のディスクへのナノギャップ対向による効果について明らかにした。さらに、**SIL** がディスクに衝突した場合に対して、衝突時のダメージを定量的に計測する衝突試験機を提案した。そして、衝突試験により新規に開発された近接場光ディスク用のトップコートによる**SIL**衝突ロバスト性効果を実証し、トップコート付きディスクに対して世界で初めて近接場光による記録再生できることを実証し、トップコート付きディスクにて **100Gbyte** 容量の達成に成功した。また、メカ機構からのダストロバスト化手法として、ダストで汚染された **SIL** を清浄化する機構について提案し、その効果を実証した。

第7章「ナノギャップ技術に基づく近接場記録再生」では、前章まで述べてきたナノギャップ技術に基づいて近接場記録再生をした結果を示した。まず、近接場光記録再生用の **100Gbyte** 以上の容量を有する再生専用 (**Read Only Memory ; ROM**) ディスク、書き換え可能 (**ReWritable; RW**) ディスクの仕様について示した。次に、記録再生実験用の近接場光ディスクシステムを導入した。記録再生システムでは、ナノギャップサーボ用レーザーと記録再生用レーザーを独立分離させることを提案し、その結果、記録再生時での安定なナノギャップサーボを実現した。本システムにより、ディスク容量 **100Gbyte** 以上、転送レート **100Mbps** 以上での近接場記録再生を実証した。また、近接場光によるオーバーライト実験結果を示し、従来の光ディスクと同等の機能を実現できることを実証した。さらに、モノリシック2ビームレーザーによる近接場光ディスクシステムを開発した。本2ビームシステムでは、記録再生用レーザーを新規開発の2ビームレーザーにより2トラック同時に記録再生できることが大きな特徴であり、2ビームによる独立記録再生に成功した。そして、近接場光ディスクシステムにおいてもマルチビーム化により、高転送レート化が可能であることを実証した。最後に、ローディング機構を備えたリムーバブル動作検討機を導入し、カートリッジに入れたディスクにより、ローディング動作を伴う近接場光記録再生が実現可能であること実証した。

以上、本論文は、近接場光を用いた大容量光ディスクシステムにおいて、システム実現の前提となるナノギャップ技術に関する研究をまとめたものである。その成果は、ドライブロバスト性の観点から、ナノギャップサーボ技術、チルトサーボ技術、そしてこれらの技術を支える要素技術としてディスク基板、SIL アクチュエーター、スピンドルモーターによるナノギャップ高精度化技術について優れた性能を得たことである。そして、ダストロバスト性の観点から、SIL のエアフロー効果、アクティブサーボ効果、ナノギャップ効果によるダストロバスト化、ディスク表面のトップコートによる SIL 衝突ロバスト化、SIL 汚染時のクリーニング機構についても新たな性能を得ており、これらの技術により安定した近接場光による記録再生が可能であることを示すことができた。

以上、本研究成果であるナノギャップ技術を用いた近接場光ディスクシステムにより、ディスク回転数 3000rpm、ディスク面ぶれ $100\mu\text{m}$ を許容し、100Mbps 以上の転送レートで 100Gbyte 以上のディスク容量が達成できることを、世界で初めて実証できた。本研究成果は、近接場光ディスクシステムの実現に対して十分に寄与するものである。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、終始ご懇切なるご指導とご鞭撻を賜りました早稲田大学理工学術院基幹理工学部情報理工学科 松山泰男教授に深い敬意と感謝を表します。

そして、有益な御教示と御指導を賜りました同学部情報理工学科 大附辰夫教授、同学部情報理工学科 入江 克教授、同学部電子光システム学科 宇高勝之教授、同学部情報理工学科 小松尚久教授に深く感謝致します。

また、私の修士課程在学時において、研究に対する姿勢を教えて頂き、研究者としての原点となる研究指導をして下さった早稲田大学 秋月影雄名誉教授に対して深い尊敬と感謝の念が堪えません。

本論文は、私が 1999 年から 2007 年においてソニー株式会社にて行った研究成果をまとめたものです。本研究を行う機会を与えて下さり、終始変わらぬご理解を賜りましたソニー株式会社マテリアル研究所コーポレート R&D ダイレクター兼光応用研究部長 山本眞伸氏、同研究所光メディア研究部長 川久保 伸氏 同研究所光記録開発部長 小林誠司氏に厚く御礼を申し上げます。

また、本研究開発プロジェクトリーダーであり、本研究に対して数々の御教示、御忠告、叱咤激励を親身に行っていただきました同社マテリアル研究所光メディア研究部第 2 グループ統括課長 中沖有克氏に心から厚く感謝を申し上げます。そして、本研究の遂行にあたりご理解、ご協力、ご討論を頂きました同研究所光メディア研究部第 2 グループメンバー 金 善敏氏、近藤高男氏、小島直人氏、水荃 剛氏、そして元メンバーである篠田昌孝氏に対して深く感謝致します。

本研究を行うにあたっては、同社マテリアル研究部 光メディア研究部、光記録研究部、光応用研究部の皆様を中心として、本プロジェクトに関係する全ての皆様の全面的なご理解とご協力を頂くことにより成し得ることができました。特に、光学系全般に関して同研究所光記録研究部 齊藤公博氏、ディスク全般に関して同研究所光記応用研究部 山崎 剛氏のご支援とご協力を頂きました。本研究に携わって頂いた全ての関係者の皆様に対して深く感謝致します。

最後に、本研究生活を支えてくれた家族、そして父母、親戚に対して感謝致します。

研究業績

1. 論文

1. T. Ishimoto, S. Kim, T. Yamasaki, T. Yukumoto, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Approach of Improving Disk Performance to High Quality Gap Control in a Near-Field Optical Disk Drive System", Jpn. J. Appl. Phys, 46, No.6B, pp.3981-3986 (2007)
2. 齊藤 公博、篠田 昌孝、石本 努、中沖 有克、山本 眞伸、"Ga_N系 405nm 半導レーザーを用いた近接場光記録再生"、レーザー研究、Vol.35, No2, pp.86-90(2007)
3. T. Ishimoto, T. Ito, M. Shinoda, K. Saito, T. Kondo, T. Matsui, S. Kim, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Head Analysis in an Air Flow on a Near Field Optical Disk System with a 2-Axial Actuator", Jpn. J. Appl. Phys. 44, No.5B, pp. 3410-3411 (2005)
4. M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Kondo, A. Nakaoki, N. Ide, M. Furuki, M. Takeda, Y. Akiyama, T. Shimouma and M. Yamamoto, "High-Density Near-Field Optical Disc Recording", Jpn. J. Appl. Phys. 44, No.5B pp. 3537-3541 (2005)
5. T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Gap Servo System for a Biaxial Device Using an Optical Gap Signal in a Near Field Readout System", Jpn. J. Appl. Phys. 42, Part 1, No.5A, pp. 2719-2724 (2003)
6. M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Ito, A. Nakaoki, M. Yamamoto, O. Maeda, T. Hashizu, T. Asano, K. Aga, K. Takagi and M. Tazoe, "High Density Near-Field Optical Disc", Jpn. J. Appl. Phys. 45, No.2B, pp.1321-1324 (2003)
7. K. Saito, T. Ishimoto, T. Kondo, A. Nakaoki, S. Masuhara, M. Furuki and M. Yamamoto, "Readout Method for Read Only Memory Signal and Air Gap Control Signal in a Near Field Optical Disc System ", Jpn. J. Appl. Phys. 41, Part 1, No.3B pp. 1898-1902 (2002)
8. M. Shinoda, K. Saito, T. Kondo, T. Ishimoto, A. Nakaoki, "High-Density Near-Field Readout over 50GB Capacity Using Solid Immersion Lens with High Refractive Index", Jpn. J. Appl. Phys. 42, Part 1, No.2B pp. 1101-1104 (2003)
9. S. Imanishi, T. Ishimoto, Y. Aki, T. Kondo, K. Kishima, K. Yamamoto and M. Yamamoto, "Near-Field Optical Head for Disc Mastering Process", Jpn. J. Appl. Phys. 39, Part 1, No.2B pp. 800-805 (2000)
10. M. Takeda, M. Furuki, T. Ishimoto, K. Kondo, M. Yamamoto and S. Kubota, "Deep UV Mastering with a Write Compensation Technically Realizing 20GB/layer Capacity Disc", Jpn. J. Appl. Phys. 39, Part 1, No.2B pp. 797-799 (2000)

2. 国際会議

1. T. Ishimoto, T. Matsui, S. Kim, K. Saito, K. Takagi, S. Haga, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Technologies for Removability in a Near-Field Optical Disc System", Proc. SPIE, 6282 C1-C10 (2006)
2. A.Nakaoki, K.Saito, T.Kondo, T.Ishimoto, T.Matsui, S.Kim, M.Shinoda, T.Yamasaki, and M.Yamamoto, "Near-Field Optical Systems for Data Storage", International

Conference on Optics-photonics Design & Fabrication, 7S3-03, pp.67-68 (2006)

3. A. Nakaoki, M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Horigome, K. Takagi and M. Yamamoto, "Over 100GB Optical Phase-Change Disc System Realized by Near-Field Technology", European Symposium Phase Change and Ovonic Science, 24 (2005)
4. T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "High-transfer-rate near-field writable system for a polycarbonate disc", Proc. SPIE, 5380, pp. 233-242 (2004)
5. M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Kondo, A. Nakaoki, M. Furuki, M. Takeda, Y. Akiyama, T. Shimouma, and M. Yamamoto, "High-density near-field optical disc recording using phase change media and polycarbonate substrate", Proc. SPIE, 5380, pp. 224-232 (2004)
6. M. Shinoda, K. Saito, T. Ishimoto, T. Kondo, A. Nakaoki, M. Furuki, M. Takeda and M. Yamamoto, "High-density near-field readout over 100-GB capacity using a solid immersion lens with NA of 2.05", Proc. SPIE, 5069, pp. 306-311 (2003)
7. T. Ishimoto, K. Saito, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto, "Near field readout system for a high density optical ROM disc", Proc. SPIE, 4342, pp. 294-303(2001)

3. 講演

1. T. Ishimoto, S. Kim, A. Nakaoki, T. Mizugaki, T. Kondo, and O. Kawakubo, "Reliability for Lens Impact against Phase Change Recording Layer in a Near-Field Optical Disk Drive System", Proc. of the 19th Symposium on Phase Change Optical Information Storage, pp.27-30 (2007)
2. 石本 努、金 善敏、齋藤公博、近藤高男、中沖有克、川久保 伸、"ニアフィールド光ディスクシステムにおけるチルトサーボ技術"、電気学会 産業計測制御研究会、IIC-07-116、 pp 1-6 (2007)
3. N. Kojima, T. Ishimoto, M. Kaneko, A. Nakaoki, and O. Kawakubo, "NEAR FIELD HEAT ASSISTED MAGNETIC RECORDING WITH AN SIL-HAMR HEAD", Workshop on Magneto Optical Recording International Symposium, C1(2007)
4. 石本 努、金 善敏、山崎 剛、行本智美、中沖有克、山本眞伸、"ギャップサーボ性能に基づくニアフィールド用光ディスクの開発"、レーザー学会学術講演会第 27 回年次大会講演予稿集、S5-18p112, pp.S25-S26 (2006)
5. 石本 努、松井 健、金 善敏、齋藤公博、中沖有克、山本眞伸、"ニアフィールド光ディスクシステムにおけるリムーバブル技術"、信学技報、CPM2006-88、 pp 53-58 (2006)
6. T. Yamasaki, T. Yukumoto, K. Sunmin, T. Ishimoto, A. Nakaoki, F. K. Bruder, R. Oser, and K. Hildernbrand, "Evaluation of Top Coated Media for Near-Field Optical Disc System of NA 1.84", Tech. Digest of International Symposium on Optical Memory, pp. 284-285(2006)

7. 石本 努、篠田昌孝、齊藤公博、中沖有克、松井 健、金 善敏、山本眞伸、“ニアフィールド光学技術を用いた高密度光ディスク”、信学技報、CPM2005-151、pp 41-46 (2005)
8. A. Nakaoki, M. Shinoda, K. Saito, T. Kondo, T. Ishimoto, T. Matsui and S. Kim, "High Density Near Field Optical Disc Recording using Phase Change Media and Polycarbonate Substrate", Proc. of Phase Change Optical Information Storage, pp. 79-82 (2004)

4. 総説

1. 石本 努、“ニアフィールド光ディスクの技術開発動向”、オプトニュース、No.1(151)、pp. 7-12 (2006)